



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS Y
RECURSOS MINERALES**

Curso 2019-2020

**Geoformas y estructuras submarinas de
escape de hidrocarburos en las cuencas de
Talara y Tumbes (noroeste del Perú)**

Submarine geoforms and structures of hydrocarbon leakages in the Talara and
Tumbes basins (northwest of Perú)

WAI LONG NG CUTIPA

TUTOR/ES DEL TRABAJO: LUIS SOMOZA LOSADA

TERESA MEDIALDEA CELA

AGUSTÍN PIEREN PIDAL

LUIS CERPA CORNEJO

AGRADECIMIENTOS

Estoy profundamente agradecido con mis padres y familia que en todo momento me apoyaron a seguir creciendo personal y profesionalmente.

A mi novia, Auria Luz, por ser justamente la luz y fuerza para emprender y culminar este gran paso.

A mis tutores Luis Somoza, Teresa Medialdea, Agustín Pieren-Pidal y Luis Cerpa, que compartieron sus conocimientos incondicionalmente y me brindaron su muy valioso tiempo.

A los docentes del máster de “Exploración de hidrocarburos y recursos minerales” de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, quienes realizan una excelente labor en la escuela de postgrado; y al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), por el constante apoyo y participación en la formación de profesionales en el ámbito geológico.

Además, este trabajo no habría sido posible sin el apoyo del Programa de Geología Marina y Antártica del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET) y el acceso a la información sísmica proporcionada por PeruPetro S.A., a quienes agradezco de manera muy especial por seguir promoviendo la investigación.

En la actual difícil situación del COVID-19, el apoyo logístico del Grupo de Espeleología y Montaña (GEM) en la Casilla la Lastra, me permitió culminar el presente trabajo con una dedicación adecuada y principalmente, fuera de los riesgos sanitarios. Estoy eternamente agradecido con el GEM y el Canal de Isabel II.

Por último, y no menos importante, a mis amigos del máster, con quienes intercambiamos criterios, opiniones y experiencias de distintos ámbitos. Sin su amistad y apoyo sincero e incondicional, mi estadía en España y la culminación del máster habría sido muy difícil.

RESUMEN

Las cuencas de antearco Talara y Tumbes constituyen una provincia hidrocarburífera muy importante en el noroeste del Perú con estudios desde el siglo XIX, desarrollados mayormente en el continente. Estos estudios contribuyeron al mejor entendimiento de la geología y de los sistemas de hidrocarburos de la zona, con múltiples evidencias en superficie. Sin embargo el margen continental al contar con menos información, presenta aún varios aspectos por investigar. El presente trabajo se centra en el análisis de geoformas del fondo marino relacionadas con escapes de hidrocarburos, mediante el análisis de datos batimétricos, perfiles sísmicos e información reciente de plumas acústicas de gas observadas en el fondo marino de las cuencas Talara y Tumbes. En una primera fase, se realizó un reconocimiento de geoformas del fondo marino utilizando las cartas náuticas 111, 112 y 113 del Perú, diferenciándose montículos, *pockmarks*, y volcanes de fango, entre otras. Posteriormente la interpretación de siete perfiles sísmicos permitió diferenciar las secuencias sedimentarias y fallas en las cuencas, así como rasgos sísmicos relacionados con la presencia de hidrocarburos (chimeneas de gas, volcanes de fango enterrados, reflectores simuladores del fondo (BSR), anomalías de alta amplitud, etc.). Este trabajo permitió diferenciar 3 sistemas de hidrocarburos asociados al contexto estructural, temporal y unidades sedimentarias, que se relacionan estrechamente con la reciente información de plumas acústicas indicadoras de gas. Del mismo modo, se propone una nueva relación tectónica entre la cuenca continental de Tumbes con las fracturas transformantes de la corteza oceánica de la placa de Nazca (Sarmiento, Alvarado 1 y 2, Grijalva). Finalmente, debe destacarse que la información generada por este trabajo contribuye a mejorar el entendimiento de la generación, migración, y almacenamiento de hidrocarburos, así como las características sedimentarias y estructurales de las cuencas Talara y Tumbes en el margen continental.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Ubicación	5
CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO	8
2.1 Geología regional	8
2.2 Contexto tectónico y estructural	9
2.3 Estratigrafía de la cuenca Talara	10
2.4 Estratigrafía de la cuenca Tumbes	12
CAPÍTULO 3: ASPECTOS METODOLÓGICOS	14
3.1 Revisión de antecedentes	14
3.2 Modelo de elevación digital (DEM) del fondo marino	14
3.3 Perfiles de sísmica de reflexión multicanal	14
3.4 Plumas acústicas: emisiones submarinas de gas con sonda multihaz	15
3.5 Software y edición	17
3.6 Limitaciones	18
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	19
4.1 Morfoestructuras	19
4.2 Geoformas submarinas asociadas a escape de hidrocarburos	18
4.3 Análisis de secciones sísmicas y escape de hidrocarburos	21
4.3.1 Cuenca Talara	21
4.3.2 Cuenca Tumbes	31
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN	36
5.1 Geoformas submarinas de fondo marino	36
5.2 Estructuras de migración de hidrocarburos y contexto tectono-sedimentario del <i>offshore</i> de las cuencas Talara y Tumbes	36
5.2.1 Sistema 1: Cuenca mesozoica de Talara, paleo-prisma de acreción (Cretácico-Paleozoico Leads)	36
5.2.2 Sistema 2: Cuenca cenozoica de Talara, cuenca antearco (Paleoceno-Eoceno Leads)	38
5.2.3 Sistema 3: Cuenca transtensional de Tumbes (Oligoceno Superior-Mioceno Leads)	39
5.3 Morfotectónica y evolución de cuencas	42
5.4 Evolución de estilos estructurales	43
CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXO I	49

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

Figura 1.1 Morfologías y depósitos de emisiones submarinas de hidrocarburos y relación con conductos y reservorios. Tomado de Ceramicola <i>et al.</i> , 2018.....	1
Figura 1.2 Tipos de morfologías y depósitos de emisiones de hidrocarburos. Volcán de fango en A) Amón en el delta del Nilo y B) Madrid en el Golfo de Cádiz, C) Sistema de <i>pockmarks</i> en el Mar de Alborán, D) <i>Pockmarks</i> con fluido de hidrocarburos, E) Carbonatos generados por oxidación de metanos en un <i>pockmark</i> , F) Burbujas de metano en el Golfo de Cádiz (Ceramicola <i>et al.</i> , 2018).....	2
Figura 1.3 Tipos de anomalías sísmicas en los sistema de migración de hidrocarburos desde áreas fuente, conductos y morfologías superficiales (Somoza <i>et al.</i> , 2012).....	4
Figura 1.4 Imagen 3D del contexto geológico regional del área de estudio. Batimetría de GeoMappApp http://www.geomappapp.org (Ryan <i>et al.</i> , 2009). FT: Falla transformante.....	6
Figura 1.5 Mapa de situación de las áreas de estudio en el contexto de la zona de subducción. CN: Carta náutica. Límites de cuenca y altos estructurales modificado de Espurt <i>et al.</i> (2018).....	7
Figura 2.1 Síntesis estratigráfica de las cuencas Talara (CTa) y Tumbes (CTu) (modificado de Fernández <i>et al.</i> , 2005). Evolución de los Altos Estructurales y Banco Perú (BP) tomado de Espurt <i>et al.</i> (2018).....	11
Figura 3.1 Proyecto de líneas de sísmica de reflexión multicanal construido en Kingdom Suite 8.6 para este trabajo con información que permite correlacionar la estructura sísmica del subsuelo con la morfología del fondo marino y la exacta localización de las emisiones de hidrocarburos.....	15
Figura 3.2 Formas de las plumas acústicas de las emisiones submarinas de gas en función de la dirección del buque (Velooso <i>et al.</i> , 2015).....	16
Figura 3.3 A) Esquema 3d con el efecto de la dirección del buque, y B) ecograma resultante de la columna de agua de la sonda multihaz EM302 mostrando plumas acústicas (Urban <i>et al.</i> , 2017).....	17
Figura 3.4 Flujo de trabajo empleado para relacionar las geoformas submarinas con las emisiones de gas.....	18
Figura 4.1 Mapa estructural y de geoformas submarinas del área de estudio (este trabajo).....	20
Figura 4.2 Montículos y <i>pockmarks</i> en el lado N del cañón de Talara (este trabajo).....	21
Figura 4.3 A) Columna estratigráfica de las secuencias <i>offshore</i> de las cuencas Talara y Tumbes. B) Perfiles sísmicos analizados y plumas acústicas de gas (este trabajo).....	22
Figura 4.4 Estratigrafía y estructuras al S de la cuenca Talara (ubicación en la Figura 4.3B) (este trabajo).....	23
Figura 4.5 Estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos y BSR al S de la cuenca Talara (ubicación en la Figura 4.3B) (este trabajo).....	24
Figura 4.6 Estratigrafía y estructuras al N del cañón de Talara (ubicación en la Figura 4.3B). Interpretación modificada de Fernández <i>et al.</i> (2005), especialmente referente a las estructuras mesozoicas y paleozoicas. En esta sección se observa el comienzo de la cuenca de Tumbes que se desarrolla hacia el N.....	26
Figura 4.7 Perfiles sísmicos de multicanal donde se observan A) la estratigrafía en la plataforma y B) las estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos alrededor del cañón de Talara (ubicación en la Figura 4.3B y 4.8D) (este trabajo).....	27
Figura 4.8 Perfiles sísmicos de multicanal donde se observan la estratigrafía y estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos en plataforma (A, B) y talud (C), alrededor del cañón de Talara (ubicación en D y Figura 4.3B) (este trabajo).....	28
Figura 4.9 Estratigrafía y estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos en la plataforma entre Máncora y El Alto (ubicación en la Figura 4.3B) limitada por la falla de Talara como límite con la cuenca de Tumbes. El ecograma pg1 muestra la pluma acústica de gas vertical en color rojo (obtenido con sonda multihaz) (este trabajo). Los campos de <i>pockmarks</i> y plumas de gas identificados en la plataforma interna están relacionados con reservorios (AA) en los frentes de cabalgamientos de las unidades paleozoicas y mesozoicas. En la plataforma externa y talud superior, las emisiones esta relacionadas con las fallas lístricas de la cuenca eocena de Talara.....	30
Figura 4.10 Estratigrafía y estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos en el sector S de la cuenca Tumbes generada por el juego de fallas de Talara (FTA) a lo largo del talud continental y de Muerto-Pananga (FMP) transversal al talud (ubicación en la Figura 4.3B) (este trabajo).....	32

Figura 4.11 Estratigrafía y estructuras al centro de la cuenca Tumbes (ubicación en la Figura 4.3B) (este trabajo).	33
Figura 4.12 Estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos y BSR en la cuenca Tumbes (ubicación en las Figuras 4.3B y 4.11) (este trabajo).....	35
Figura 5.1 Plumas acústicas y zona de volcán de fango en los alrededores del cañón de Talara (este trabajo) relacionadas con la Cocina Malacas (rocas generadoras principalmente cretácicas). A) Profundidad del tope del Paleozoico (Andamayo & Fuentes, 2015) y B) Imagen del modelo de elevación digital.....	37
Figura 5.2 Fracturas submarinas y altos estructurales responsables de la configuración y evolución de las cuencas Talara y Tumbes (este trabajo). Datos de convergencia de la placa oceánica (mm/año) de Gripp & Gordon (2002). Altos estructurales y cuencas modificado de Espurt <i>et al.</i> (2018).....	40
Figura 5.3 Evolución geodinámica y contexto estructural relacionado con las emisiones de hidrocarburos en las cuencas Talara y Tumbes (modificado y adaptado de Calves <i>et al.</i> , 2017).....	43
Figura 5.4 Resumen de la estratigrafía de offshore en las cuencas Talara y Tumbes, evolución de estilos estructurales y tipos de emisiones de fluidos contenidos en este trabajo. Eventos tectónicos estructurales de Espurt <i>et al.</i> (2018).....	44
<u>Tablas</u>	
Tabla 4.1 Geoformas submarinas identificadas en el modelo de elevación digital (DEM) submarino.....	19

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

Los hidrocarburos se producen bajo condiciones adecuadas de calidad y cantidad de materia orgánica en el sedimento y por maduración térmica (por enterramiento o aporte de calor). Éstos migran generalmente desde la roca madre hacia la superficie por vías frágiles y/o de elevada permeabilidad hasta alcanzar un reservorio y almacenarse (si existe una trampa adecuada). En otros casos, pueden llegar a la superficie del fondo marino o directamente a la superficie y la atmósfera. Durante este recorrido, los conductos de migración en el subsuelo pueden ser identificados mediante anomalías acústicas en los registros sísmicos, mientras que si los conductos alcanzan el fondo marino generan morfologías típicas como por ejemplo depósitos asociados a la oxidación de los hidrocarburos submarinos en la superficie (Figura 1.1). Si las emisiones de hidrocarburos son mayores que su oxidación en forma de carbonatos autigénicos derivados de metano (*Methane-derived authigenic carbonates*, “MDACs”) o formación de hidratos de gas, entonces los hidrocarburos pueden ascender en la columna de agua formando lo que se conoce como “plumas acústicas” por su forma en los ecogramas que se obtienen con sondas batimétricas.

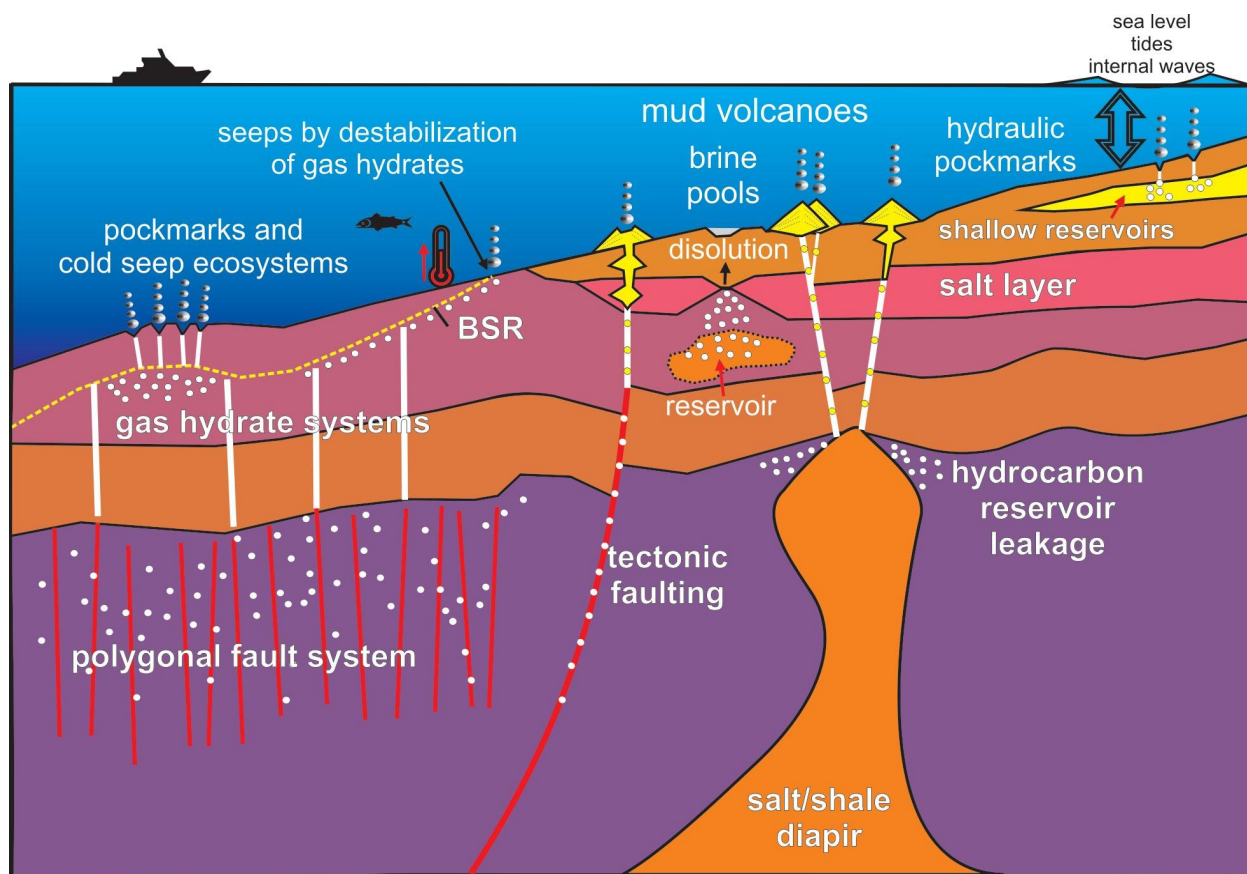


Figura 1.1 Morfologías y depósitos de emisiones submarinas de hidrocarburos y relación con conductos y reservorios. Tomado de Ceramicola *et al.*, 2018.

Las morfologías y depósitos submarinos ligados a emisiones de hidrocarburos (Figuras 1.1 y 1.2) pueden encontrarse inactivas o activas (como emisiones de hidrocarburos en la superficie o en la columna de agua), y el análisis de éstas en el subsuelo brindan información sobre el funcionamiento y estructura de los reservorios en profundidad, y la frecuencia de migraciones de hidrocarburos.

En el relieve del fondo marino se reconocen las siguientes morfologías y depósitos asociados a emisiones submarinas de hidrocarburos (Judd & Hovland, 2009; Ceramicola *et al.*, 2018) (Figura 1.2):

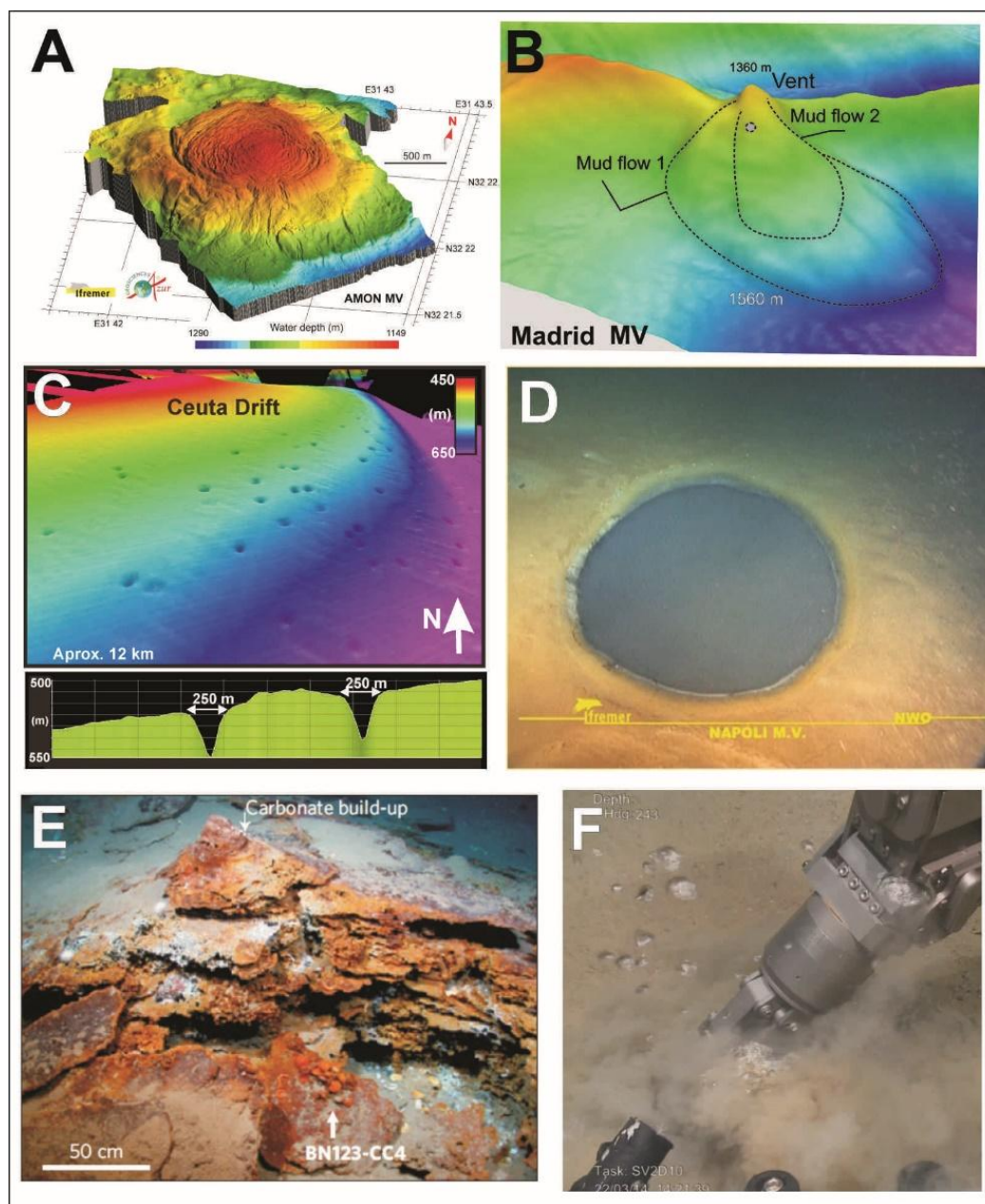


Figura 1.2 Tipos de morfologías y depósitos de emisiones de hidrocarburos. Volcanes de fango A) Amón en el delta del Nilo y B) Madrid en el Golfo de Cádiz, C) Campo de *pockmarks* en el Mar de Alborán, D) *Pockmarks* con fluido de hidrocarburos, E) Carbonatos generados por oxidación de metanos en un *pockmark*, F) Burbujas de metano en el Golfo de Cádiz. Figura modificada de Ceramicola *et al.* (2018).

a) Volcanes de fango (Figuras 1.2A, 1.2B y 1.3): Son estructuras semi-circulares a circulares (a veces elongadas) vistas en planta, con diámetros de hasta pocos kilómetros y altura de hasta unos 200 m. Se forman por constantes extrusiones (erupciones) de fango y fragmentos de roca arrancados durante el ascenso, junto con hidrocarburos y/o agua (dulce, salada y/o salmuera; Ceramicola *et al.*, 2018). En los perfiles sísmicos, los reflectores presentan baja pendiente en los flancos ($<2^\circ$, aunque se han reportado hasta 11°), y éstos se superponen diferenciándose a veces varios eventos de extrusión. Debajo de la zona de salida, se presenta usualmente una columna vertical caracterizada por reflectores caóticos y discontinuos con distinta orientación a la de los sedimentos adyacentes, lo que se interpreta como un conducto de alimentación (Løseth *et al.*, 2009). La extrusión está relacionada con fracturas ocasionadas por la presión tectónica o por sedimentación.

b) Pockmarks (Figuras 1.2C y 1.2D): Son depresiones circulares u ovaladas, que se producen principalmente por la emisión de gas y agua a sobrepresión que desestabiliza los sedimentos y produce colapsos. Se presentan aislados, agrupados o alineados (indicando zonas de falla o paleocanales en el subsuelo). Su profundidad es generalmente de unos 10 m, aunque los *pockmarks* gigantes pueden tener más de 500 m incluso y hasta 1,5 km de diámetro. Sísmicamente, se observan como depresiones que se encuentran frecuentemente encima de zonas de señal sísmica degradada y/o encima de anomalías de gran amplitud (depósitos someros de gas).

c) Depósitos de carbonatos autigénicos derivados de la oxidación de metano (MDACs) y otros hidrocarburos (Figura 1.2E): Este tipo de depósitos comprende chimeneas, pavimentos y montículos de carbonatos autigénicos que indican la oxidación masiva de hidrocarburos (Díaz del Río *et al.*, 2003; Judd & Hovland, 2009). La formación masiva de carbonatos tiene lugar por la simbiosis entre *Archaeas* y bacterias sulfo-reductoras (SRB) (Boetius *et al.*, 2000) que generan carbonatos y sulfuros (piritas), respectivamente, como consecuencia de la oxidación del CH_4 procedente de las emisiones de hidrocarburos y de la reducción del ión SO_4^{2-} procedente del agua marina.

d) Hidratos de gas: Es un compuesto cristalino constituido de metano en estructuras de moléculas de agua similares al hielo (clatratos), que son estables a baja temperatura y alta presión, y que se pueden encontrar sobre el fondo marino, formando montículos, o en el subsuelo. Sísmicamente, los hidratos de gas se identifican por la presencia de un reflector que simula el fondo marino en el subsuelo (*Bottom Simulating Reflector*, BSR por sus siglas en inglés) y que interfiere con los demás reflectores “verdaderos” (Figura 1.1.).

El reflector BSR está caracterizado acústicamente por una impedancia negativa respecto al fondo marino debido a la mayor velocidad V_p en la capa de hidratos con respecto a la zona

de gas libre. A veces, el BSR está solo definido por bolsas de anomalías de alta amplitud que reflejan la presencia de gas libre atrapado por debajo de la capa de gases hidratados. Los gases hidratados son estables en ambientes relativamente profundos y con alimentación activa de gas.

e) Chimeneas de gas (Figura 1.3): Se relacionan con zonas de fracturación hidráulica y/o tectónica de sedimentos o roca, que muestran reflectores con distintas amplitudes y orientaciones a causa de la presencia de gas. Esta zona funciona como un conducto de migración y origina reflectores de alta amplitud en los alrededores (y por encima), que se interpretan como capas permeables saturadas de hidrocarburos (Løseth *et al.*, 2009).

Otras geoformas como cráteres, zonas de falla, conductos de fractura vertical, o rasgos sísmicos como zonas de amplitud tenue y brillante, constituyen también indicadores de migraciones en el subsuelo y emisiones de hidrocarburos.

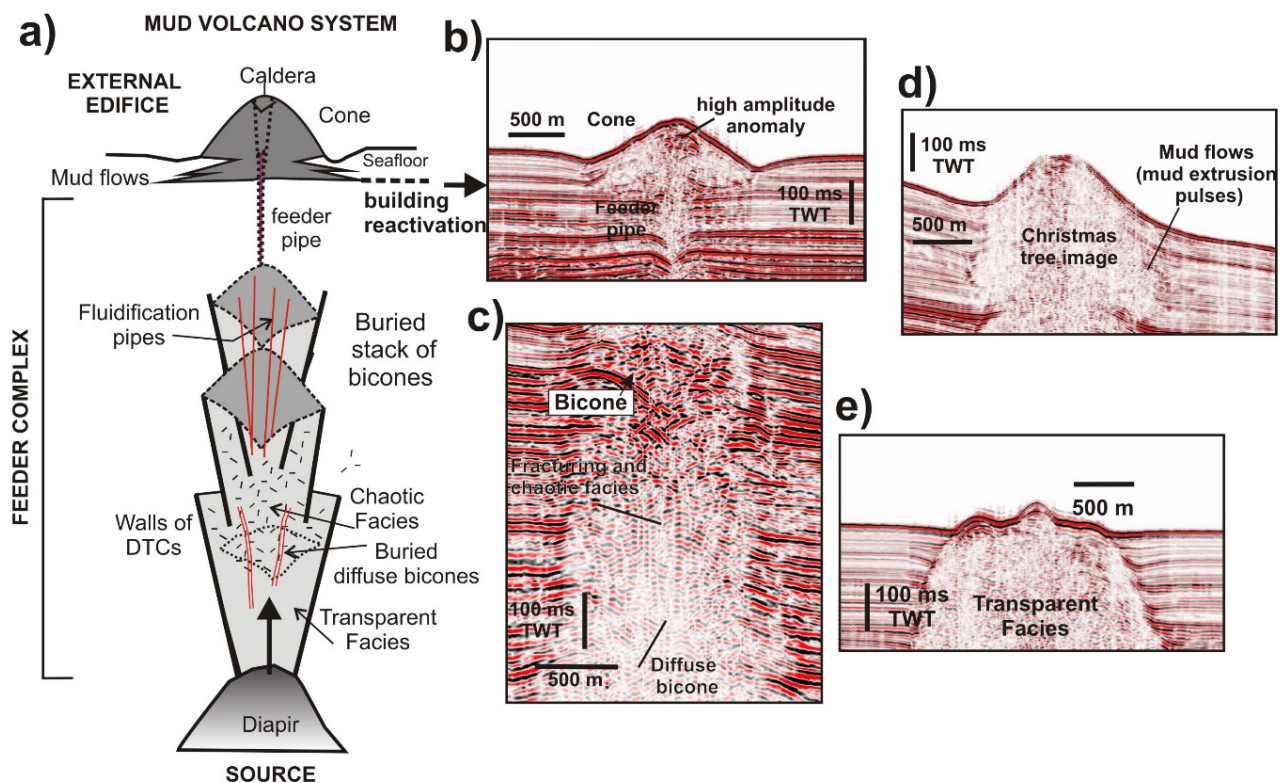


Figura 1.3 Tipos de anomalías sísmicas en los sistema de migración de hidrocarburos desde áreas fuente, conductos y morfologías superficiales. Tomado de Somoza *et al.* (2012).

Estas estructuras relacionadas con la migración y emisión de hidrocarburos se forman en márgenes pasivos y activos, en áreas de compresión tectónica, en ambientes deltaicos caracterizados por una rápida deposición de sedimentos asociados a subsidencia, áreas con alto gradiente geotermal o cuando los reservorios de hidrocarburos termogénicos alcanzan los estados finales de generación de gas (Ceramicola *et al.*, 2018).

En consecuencia, las morfologías submarinas relacionadas con emisiones de hidrocarburos evidencian la existencia de un potencial sistema de hidrocarburos en profundidad, siendo por lo tanto muy importantes para conocer nuevos recursos no convencionales como las reservas de hidratos de gas en el subsuelo y en otros casos, como el de emisiones de metano en la columna de agua para evaluar su contribución natural al calentamiento global.

1.2 Objetivos

Siguiendo esta línea de investigación, el presente trabajo tiene como objetivo principal, reconocer geoformas submarinas asociadas a la migración de fluidos ricos en hidrocarburos y establecer su relación con los reservorios profundos, conductos y tipos de emisiones submarinas de hidrocarburos que se generan a lo largo de la evolución morfo-tectónica en la parte NO del margen continental peruano (cuencas de Talara y Tumbes).

Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- 1) reconocer y diferenciar geoformas en el fondo marino relacionadas con la migración de hidrocarburos,
- 2) diferenciar secuencias sismo-estratigráficas,
- 3) identificar anomalías y estructuras sísmicas relacionadas con la migración de hidrocarburos, y
- 4) relacionar las emisiones submarinas de gas, los sistemas de migración de hidrocarburos y las secuencias sismo-estratigráficas.

1.3 Ubicación

La zona de estudio se encuentra en la parte NO del margen continental de Perú en el límite de las placas de Nazca y Sudamérica. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas 80°55' O y 03°25' S, y 81°55' O y 05°25' S; en donde se realiza un análisis más minucioso en 3 sectores: el cañón submarino de Talara, el talud marino al OSO de Paita y el S del Banco Perú (Figuras 1.4 y 1.5). Comprende las cartas náuticas 111, 112 y 113 del Perú, donde se encuentran las cuencas Talara y Tumbes frente a los departamentos de Piura y Tumbes respectivamente.

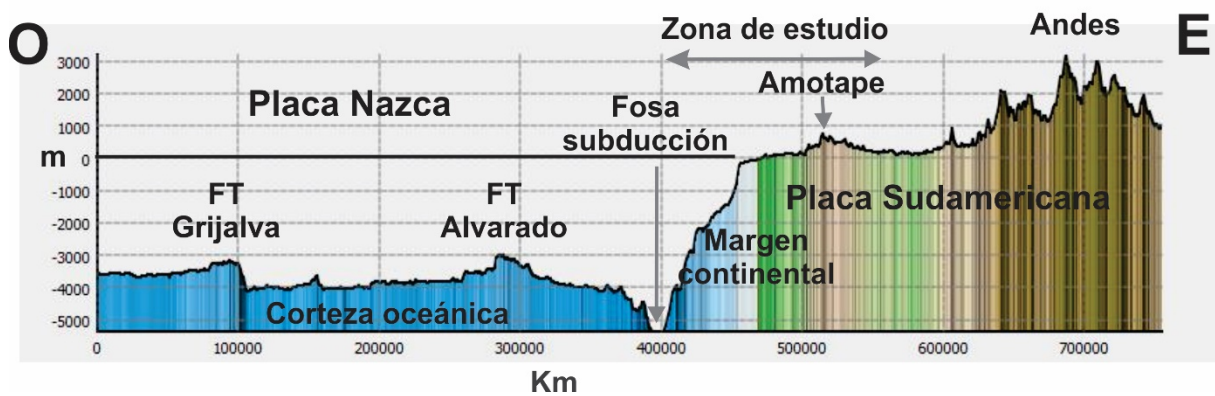
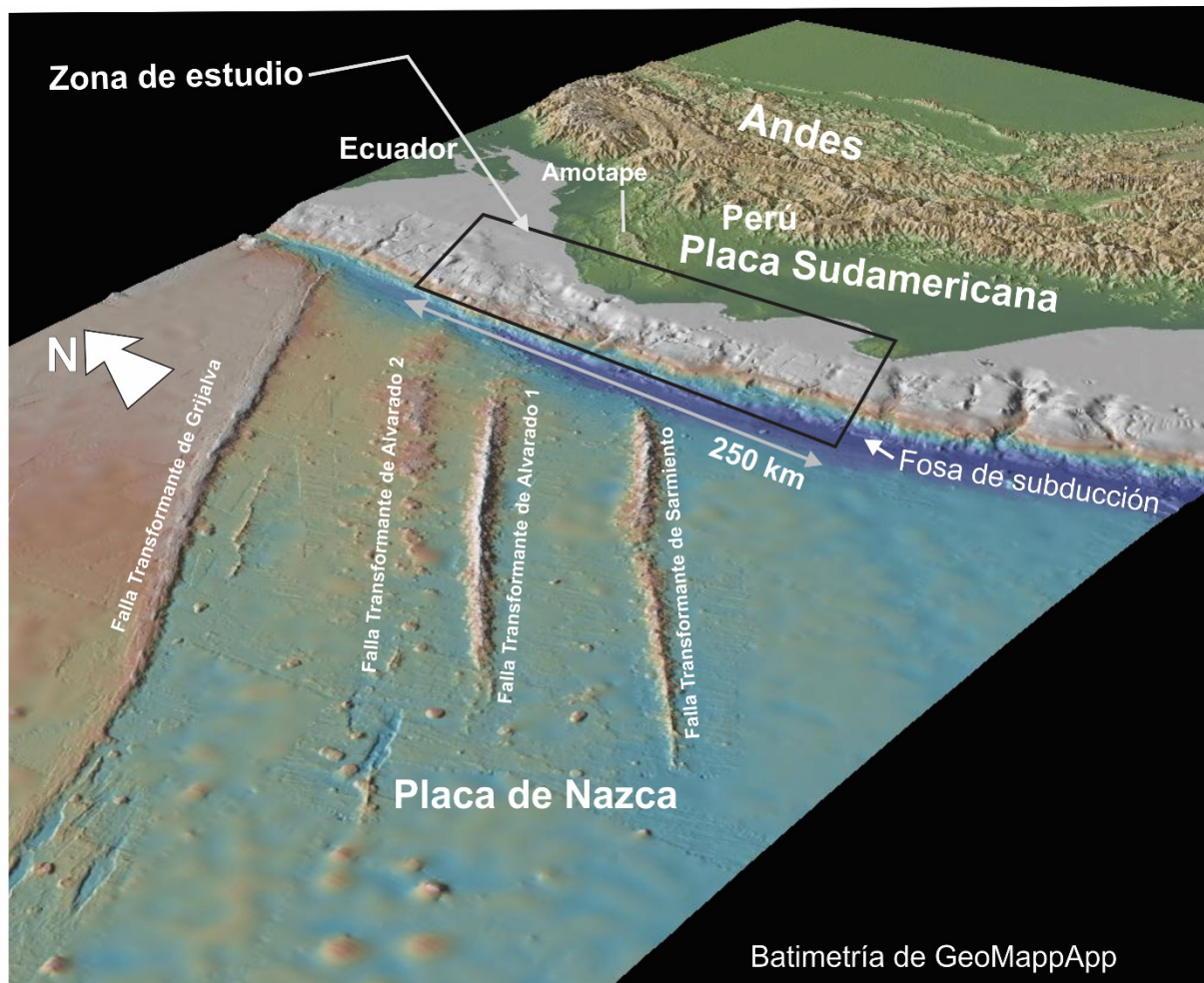


Figura 1.4 Imagen 3D del contexto geológico regional del área de estudio. Batimetría de GeoMappApp <http://www.geomapapp.org> (Ryan *et al.*, 2009). FT: Falla transformante.

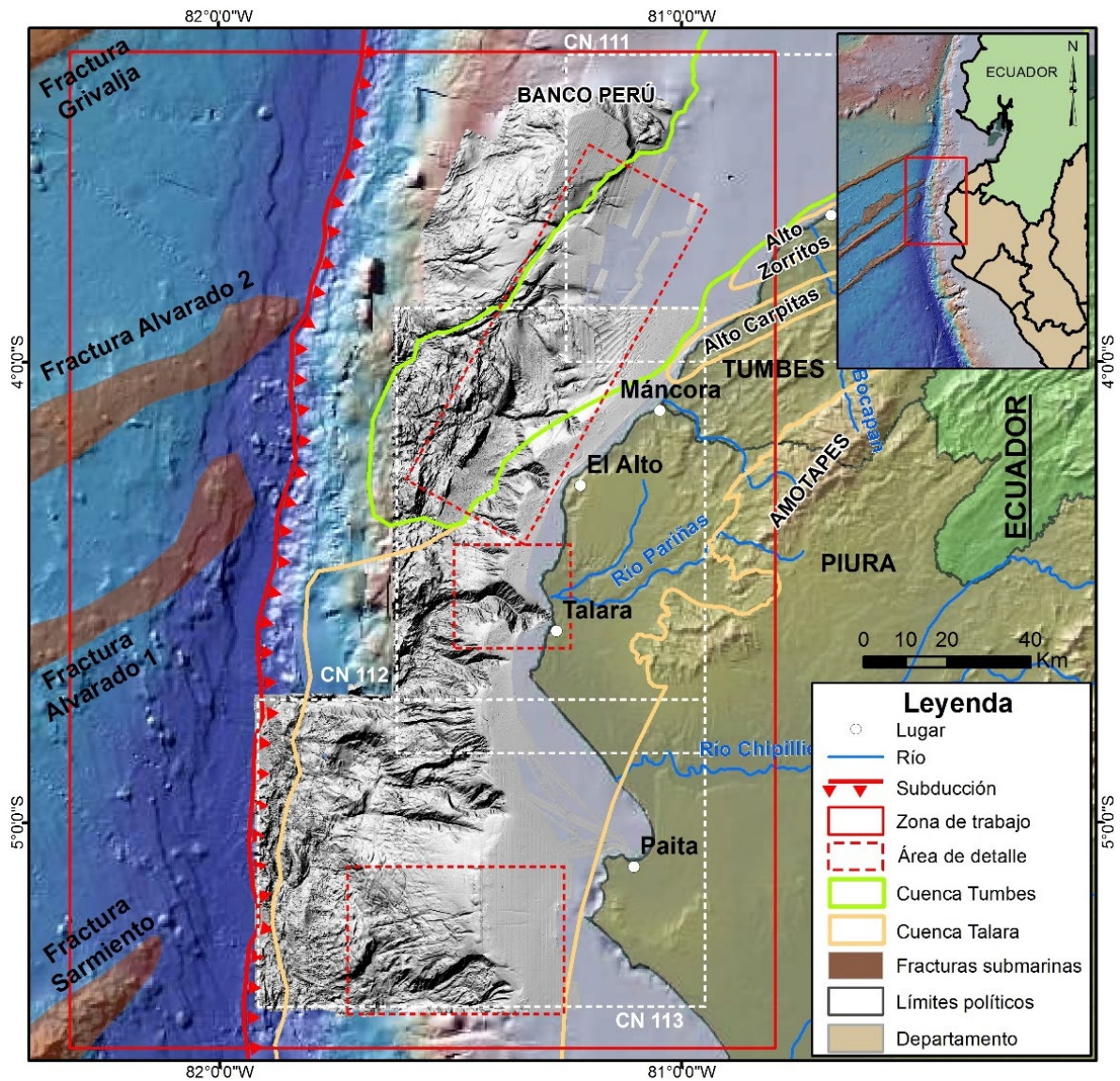


Figura 1.5 Mapa de situación de las áreas de estudio en el contexto de la zona de subducción. CN: Carta náutica. Límites de cuenca y altos estructurales modificado de Espurt *et al.* (2018).

CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO

Las cuencas Talara y Tumbes, han sido ampliamente exploradas desde el siglo XIX, realizándose el primer pozo en Perú en 1863 en la localidad de Zorritos. Hacia 1920 ya existían 1000 pozos perforados en ambas cuencas, mientras que en el 2005 se contaban solo en el margen continental, con 18 pozos perforados en la cuenca Tumbes y cerca de 1300 en la cuenca Talara (este último, de un total de 13 200 pozos perforados incluyendo la zona continental; Fernández *et al.*, 2005).

Los estudios geológicos se desarrollaron progresivamente, sobre todo entre 1990 y la actualidad en paralelo con la evolución del conocimiento geológico y tecnológico, como la moderna recolección de datos, procesamiento y reprocesamientos.

En el 2005 PeruPetro S.A. realizó un estudio integral de hidrocarburos en las cuencas Talara y Tumbes, el cual se toma como referencia principal para este capítulo, al analizar las cuencas en su conjunto. Posteriormente se realizaron diversos estudios específicos, como los estratigráficos y secuenciales (como los de Daudt, 2009; Diniz *et al.*, Daudt *et al.* y Laverde *et al.*, 2010; Gulelmo de Souza *et al.*, 2012; Lajo *et al.*, 2018; Morales *et al.*, 2019 y 2020), tectónicos (Lajo y Jiménez., 2011; Andamayo y Fuentes., 2015; Espurt *et al.*, 2018; Aizprua *et al.*, 2019), sobre BSR e hidratos de gas (Tejada y Gomes, 2015 y Auguy *et al.*, 2017), emisiones de gas submarino (Ancoco, 2019) y de estructuras sísmicas relacionadas a hidrocarburos (Calvès *et al.*; 2017). Asimismo, más al S del área de estudio (cuenca Trujillo), existen estudios sobre BSR e hidratos de gas (Herbozo *et al.*, 2013).

2.1 Geología regional

En los alrededores de la zona de estudio, se encuentran rocas desde el Paleozoico hasta la actualidad que se desarrollaron durante 2 periodos tectónicos: El pre Andino y el Andino.

El periodo pre-Andino consta de secuencias desde el Ordovícico al Carbonífero en la parte NO del Perú. En las cuencas Talara y Tumbes, en lo correspondiente a este periodo, solo se registra la secuencia siliciclástica (cuarcitas, pizarras y argilitas) de la Fm. Amotape (1500 m, Pensilvánico) intruidas por granitos pérmicos. Las cuarcitas, constituyen reservorios comprobados en los campos de petróleo de Portachuelo y Laguna (lado N).

El periodo Andino se desarrolla desde el inicio de la subducción del margen Pacífico (Permo-Triásico), que en el Perú está representado por un arco volcánico continental del mismo periodo (Fernández *et al.*, 2005). En el territorio peruano se diferenciaron 5 secuencias estratigráficas en el Cretácico (2500 m de sedimentos siliciclásticos y carbonatos pobres en materia orgánica, la base actúa como sello para los reservorios del Paleozoico), aunque en el área de estudio están ausentes las secuencias I y III. El Cretácico, se presenta en varios

sectores de la cuenca a excepción del sector N (área Carpitás). La Secuencia II (250 m de espesor) está conformada por las Fms. Pananga (areniscas calcáreas y conglomerados basales, con cuerpos de cuarcitas y pizarras que cambian a calizas fosilíferas de coral y cristalinas neríticas) y Muerto (calizas fosilíferas argílicas, negras con fuerte olor a petróleo y foraminíferos pelágicos), ambas del Albiense. Sobre el techo de la Secuencia II existe una discordancia, sobre la cual se depositan las secuencias IV y V (Campaniense-Maastrichtiense) que representan una transgresión que marca el final del Cretácico. La secuencia IV está constituida por las Fms. Sandino (conglomerado con lutitas guijarrosas en matriz arenosa, 150 m), Redondo (lutitas fosilíferas negras y marrones, 950 m) y Monte Grande (areniscas y lutitas, 300 m). Hacia el S de la cuenca Talara (subcuenca Chira), algunas capas de areniscas y conglomerados son mucho más gruesas (zona proximal de aportes) en la Fm. Monte Grande. La Secuencia V comienza con conglomerados de arena, guijarros de cuarzo y chert de la Fm. Ancha (250 m), y sobre ésta, se encuentran lutitas de la Fm. Petacas (750 m; Fernández *et al.*, 2005).

La cuenca cenozoica de antearco ("*fore-arc*") de Talara se formó como un espacio individual conteniendo un relleno de edad Paleoceno hasta el Eoceno, y luego, en el Oligoceno Inferior, se originó la cuenca Tumbes.

El movimiento de la corteza oceánica en el Oligoceno medio (26-27 Ma), entre otras cosas, originó la activación de la mega cizalla Banco Perú-Guayaquil-Dolores, la formación de la cuenca de Tumbes y la erosión de las secuencias del Oligoceno inferior, y los últimos levantamientos en la cuenca Talara (Fernández *et al.*, 2005).

2.2 Contexto tectónico y estructural

El área de estudio es el resultado de la subducción de corteza oceánica (incluyendo las grandes fracturas submarinas), la formación de las montañas Amotapes, el sistema de fallas transcurrentes y el levantamiento del Banco Perú (con extensión hacia la gran zona de cizalla Guayaquil y Dolores), y los cambios eustáticos (Figura 1.5). En consecuencia, la cuenca Talara está delimitada al E por La Brea Hill y las Montañas Amotapes (margen continental), mientras que hacia el O por fallas normales lítricas (plataforma somera), la zona de acreción y la fosa oceánica (plataforma profunda). La cuenca Tumbes (el mayor semi-graben controlado por la falla Banco Perú) se encuentra limitada por el Banco Perú al O, y por los Altos Zorritos-Piedra Redonda, Carpitás y las montañas Amotape al E (Fernández *et al.*, 2005; Figura 1.5).

En la cuenca Talara se produjeron eventos tectónicos durante el Paleoceno y Eoceno Medio, con reactivación en el Neógeno, que se superponen a los eventos tectónicos más antiguos de las secuencias inferiores (Paleozoico y Cretácico). El estilo estructural se caracteriza por fallas

gravitacionales de bajo ángulo y grandes fallas transcurrentes verticales, originando estructuras anticlinales de *rollover*, bloques fallados y rotados, y fallas de crecimiento (asociadas a fallas lítricas), enraizados y controlados por las unidades del Paleozoico y del Cretácico. La fracturación es más intensa en el continente y la plataforma somera con inclinación al O (también en la cuenca Tumbes; Fernández *et al.*, 2005).

La cuenca Tumbes presenta un estilo estructural relacionado con la falla Banco Perú (edad contemporánea al megacizallamiento Guayaquil-Dolores), que generó estructuras de tectónica gravitacional (estructuras anticlinales de *rollover* y bloques fallados y rotados) con nivel de despegue en la base de las Fms. Heath y series pre-Máncora. Estos se produjeron principalmente durante la sedimentación de las Fms. Mal Pelo y La Cruz (Plioceno-Pleistoceno) y en la actualidad afectan a las secuencias más recientes (Fernández *et al.*, 2005).

2.3 Estratigrafía de la cuenca Talara

El espesor de sedimentos Paleocenos-Eocenos es de 7900 a 9700 m (depositados en 30 Ma), en el norte y sur respectivamente; que se agrupan en 4 secuencias principales (Figura 2.1).

La secuencia Paleocena, está formado por el Gr. Mal Paso (areniscas de la Fm. Meza y en la parte superior, lutitas negras foraminíferas de la Fm. Balcones) que yace mediante discordancia sobre la Fm. Petacas (parte superior de la secuencia Cretácica V). El Gr. Mal Paso tiene unos 2000 m de potencia en el S de la cuenca (Fernández *et al.*, 2005).

La secuencia Eocena I (Eoceno Inferior e Inferior-Medio, potencia de 2700 m al S y 4500 m al N, depositado en 5 Ma aprox.) empieza con el conglomerado basal Salina que localmente se superpone en conformidad a la Fm. Balcones. Continuando, se sitúan las facies lutíticas de la Fm. San Cristóbal que forman la parte inferior de esta secuencia junto con el basal Salina (de naturaleza más marina). Sobre estos y hacia el S de la cuenca, se encuentran areniscas con intercalaciones de lutitas de la Fm. Salina, que hacia el N cambian a sedimentos más gruesos y conglomerados de la Fm. Mogollón. Encima de la Fm. Salina y en conformidad, se depositan lutitas fosilíferas con algunas intercalaciones de areniscas de la Fm. Palegreda, que al N se vuelven más arenosas constituyendo la Fm. Ostrea. La parte superior de esta secuencia la conforman las Fms. Pariñas y Chacra que se superponen a la Fm. Clavel. La Fm. Pariñas (S de la cuenca) está formada por arenas finas a conglomerádicas con algunas intercalaciones de lutitas, que hacia el N tiene equivalente temporal con las Fms. Clavel y Cabo Blanco. Esta última, consta de areniscas gruesas y conglomerados de facies fluvio-deltaicas que socaban la Fm. Clavel. La Fm. Chacra (en conformidad sobre la Fm. Pariñas) está constituida por lutitas fosilíferas gris verdosas, que al N cambian a facies arenosas de la Fm. Echinicyamus (Fernández *et al.*, 2005; Figura 2.1).

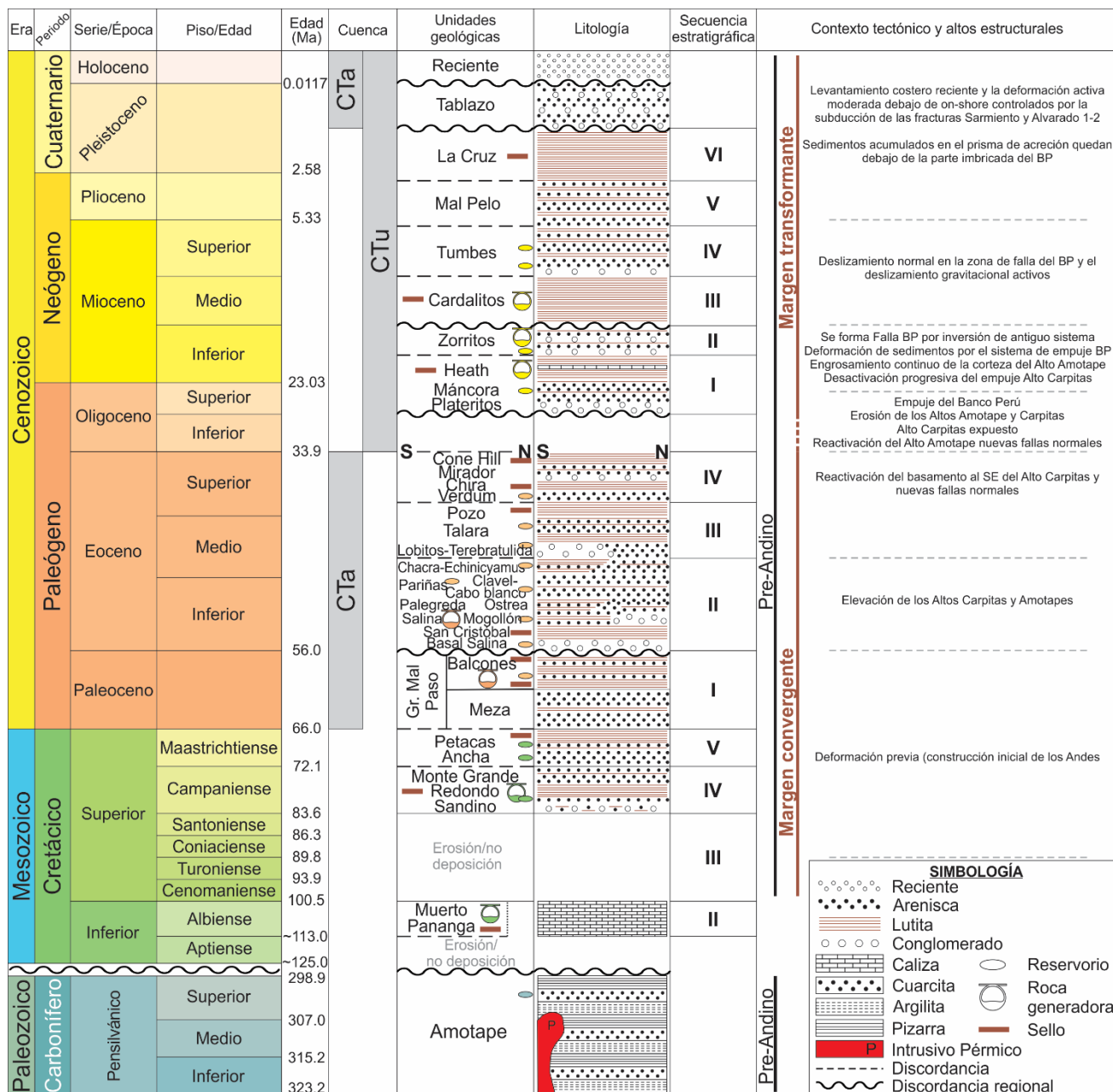


Figura 2.1 Síntesis estratigráfica de las cuencas Talara (CTa) y Tumbes (CTu) (Modificado de Fernández *et al.*, 2005). Evolución de los Altos Estructurales y Banco Perú (BP) tomado de Espurt *et al.* (2018).

La secuencia Eocena II (Eoceno Medio y Medio-Superior, potencia de 600 m al N por erosión y 2000 m al S, depositado en 12 Ma aprox.), lo conforma el Gr. Talara que se dispone mediante discordancia sobre la Fm. Chacra. Forman la base del grupo, los conglomerados Lomitos que al N pasan a ser areniscas Terebratula, sobre las que se encuentran las lutitas Talara. Estas últimas, cambian lateralmente de facies hacia la parte superior a unidades de areniscas con lutitas de las areniscas Talara. El techo de la secuencia está constituido por lutitas grises de la Fm. Pozo (Figura 2.1). En las lutitas Talara se observan deslizamientos gravitacionales de grandes bloques. En la parte superior de la secuencia, se encuentran areniscas turbidíticas de la Fm. Helico que constituyen reservorios de petróleo comprobados. Hacia el N de la

cuenca, las areniscas Talara y lutitas Pozo están ausentes por erosión posterior al Eoceno Medio (Fernández *et al.*, 2005).

La secuencia Eocena III (Eoceno Superior, potencia de 1300 m al N y 3000 m al S, depositado tan solo en 4 Ma) se inicia con areniscas cuarzosas de la Fm. Verdum que yacen en discordancia y hacen *onlap* sobre el Gr. Talara. Continuando la secuencia, se sitúan lutitas negras de la Fm. Chira. Esta parte inferior de la secuencia se encuentra en gran parte de la cuenca, sobre la cual se depositan lutitas, areniscas y conglomerados de la Fm. Mirador y lutitas de la Fm. Cone Hill (Fernández *et al.*, 2005; Figura 2.1).

El Pleistoceno, está representado por arenas marinas calcáreas y una coquina muy fosilífera que constituyen la Fm. Tablazos (Figura 2.1), los que yacen mediante discordancia sobre las secuencias tanto Paleozoicas, como Cretácicas, Paleógenas y Neógenas en la cuenca Talara. La Fm. Tablazos cubre los sedimentos cenozoicos en el sector oeste de las montañas Amotapes (Fernández *et al.*, 2005).

2.4 Estratigrafía de la cuenca Tumbes

Están presentes sedimentos desde finales del Oligoceno al Plioceno, diferenciándose 5 secuencias estratigráficas que se encuentran discordantes sobre sedimentos del Eoceno. Las secuencias son reconocidas en el continente y en el margen continental, y la secuencia más antigua se dispone en *onlap* sobre los sedimentos del Eoceno Medio y Superior, y la Fm. Amotapes (Paleozoica, desde el área de Máncora hacia el NE). Las formaciones cenozoicas y la Fm. Amotapes en el NE de la cuenca están afectadas por el intrusivo granítico Higuérón. La secuencia en su conjunto tiene una potencia de 7100 a 6200 m (en 35 Ma) en el continente y en el margen continental, respectivamente; y tiene continuidad en Ecuador (Fernández *et al.*, 2005).

La Secuencia I (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, Figura 2.1) representa el principal episodio de transgresión, se inicia con areniscas y conglomerados basales (miembro Plateritos) y hacia la parte superior le suceden areniscas y lutitas (Fm. Máncora). Por encima y en contacto transicional, se encuentran lutitas grises oscuras, limolitas y algunas calizas y margas ricas en materia orgánica de la Fm. Heath (Fernández *et al.*, 2005).

La Secuencia II (Mioceno Inferior, Figura 2.1) corresponde a un periodo de rápida sedimentación y está formada por conglomerados y areniscas de ambiente fluvial, deltaico y litoral, con lutitas de distintos colores en menor proporción (Fm. Zorritos). Es el principal reservorio en la cuenca y en Ecuador (Fernández *et al.*, 2005).

A continuación de la Secuencia II, se reconoce una caída del nivel del mar con la consecuente exposición y erosión de la Fm. Zorritos. La Secuencia III (Mioceno Medio) está representada

por lutitas de la Fm. Cardalitos que rellenan paleovalles de incisiones profundas, en discordancia erosiva interpretadas como numerosos canales profundos (Fernández *et al.*, 2005).

La Secuencia IV (Mioceno Superior, Figura 2.1) está formada por depósitos clásticos gruesos, de ambiente marino somero (en el continente) de la Fm. Tumbes que cambian de facies a areniscas y lutitas (en el margen continental). Existe una discordancia entre las secuencias III y IV (Fernández *et al.*, 2005).

La Secuencia V (Mioceno Superior-Plioceno Superior) está representada por una gruesa sección de clásticos de la Fm. Mal Pelo.

Finalmente, las secuencias anteriores están cubiertas por lutitas de la Fm. La Cruz (Secuencia VI, Plioceno Superior-Pleistoceno, Figura 2.1). En áreas estructuralmente altas de la secuencia V, se observa una erosión localizada de la Fm. La Cruz, así como deposición sin-tectónica sobre fallas de crecimiento (Fernández *et al.*, 2005).

CAPÍTULO 3: ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 Revisión de antecedentes

La fase inicial del trabajo consistió en la búsqueda y consulta de información estructural, estratigráfica, de cuenca, litológica, modelamiento 2D y 3D, entre otros; en artículos científicos, tesis, libros electrónicos, resúmenes y presentaciones de congresos en eventos nacionales e internacionales, etc. Estos datos se han expuesto en el Capítulo 2 “Marco geológico”.

Las líneas sísmicas se consultaron y obtuvieron del portal de banco de datos de PeruPetro S.A. y las emisiones de gas submarino de la plataforma geológica online GEOCATMIN del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), las que se exponen en el Capítulo 4.

3.2 Modelo de elevación digital (DEM) del fondo marino

Este recurso se obtuvo en formato GeoTiff, correspondiente a las cartas náuticas 111, 112 y 113 del Perú (Figura 1.5); con 25, 30 y 50 m de tamaño de pixel respectivamente; elaborados por el INGEMMET y la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) de la Marina de Guerra del Perú recolectadas en campañas de Geología Marina.

Este DEM se ha utilizado para la delimitación de diferentes geoformas como montículos, *pockmarks*, etc.; que fueron agrupadas por zonas de acuerdo a su predominancia como zonas de montículos, *pockmarks*, montículos y *pockmarks*, y volcanes de fango. También se delimitaron otras estructuras como fallas y escarpes de deslizamientos.

3.3 Perfiles de sísmica de reflexión multicanal

Se ha construido un proyecto con el programa Kingdom Suite para el tratamiento e interpretación sísmica de 48 perfiles sísmicos en formato SEG-Y que suman un total de 1643 km de información lineal procedentes de campañas realizadas entre 1979 y 2009, que se encuentran en el archivo de PeruPetro (Anexo 1). El proyecto de Kingdom Suite se ha realizado en proyección UTM huso 17S (WGS-84) y se han importado a) las imágenes geo-referenciadas del relieve submarino elaboradas por el INGEMMET y el DHN de la Marina de Guerra del Perú en formato GeoTiff; y b) la localización de las plumas acústicas en formato *shapefile* de ArcGis; con el objeto de establecer la correlación entre la estructura sísmica, la morfología y la localización de las emisiones submarinas. El tipo de procesado de las líneas sísmicas y otras características se muestran en el Anexo 1.

La delimitación de unidades sismo-estratigráficas se realizó considerando los fundamentos de estratigrafía secuencial y de subsuelo (Catuneanu, 2006; Embry, 2009; & Catuneanu *et al.*,

2011). Se observaron superficies de erosión, truncaciones, terminaciones de sedimentación, naturaleza de las secuencias (progradante, agradante, retrogradante, degradante), así como características de amplitud, continuidad y frecuencia de los reflectores sísmicos.

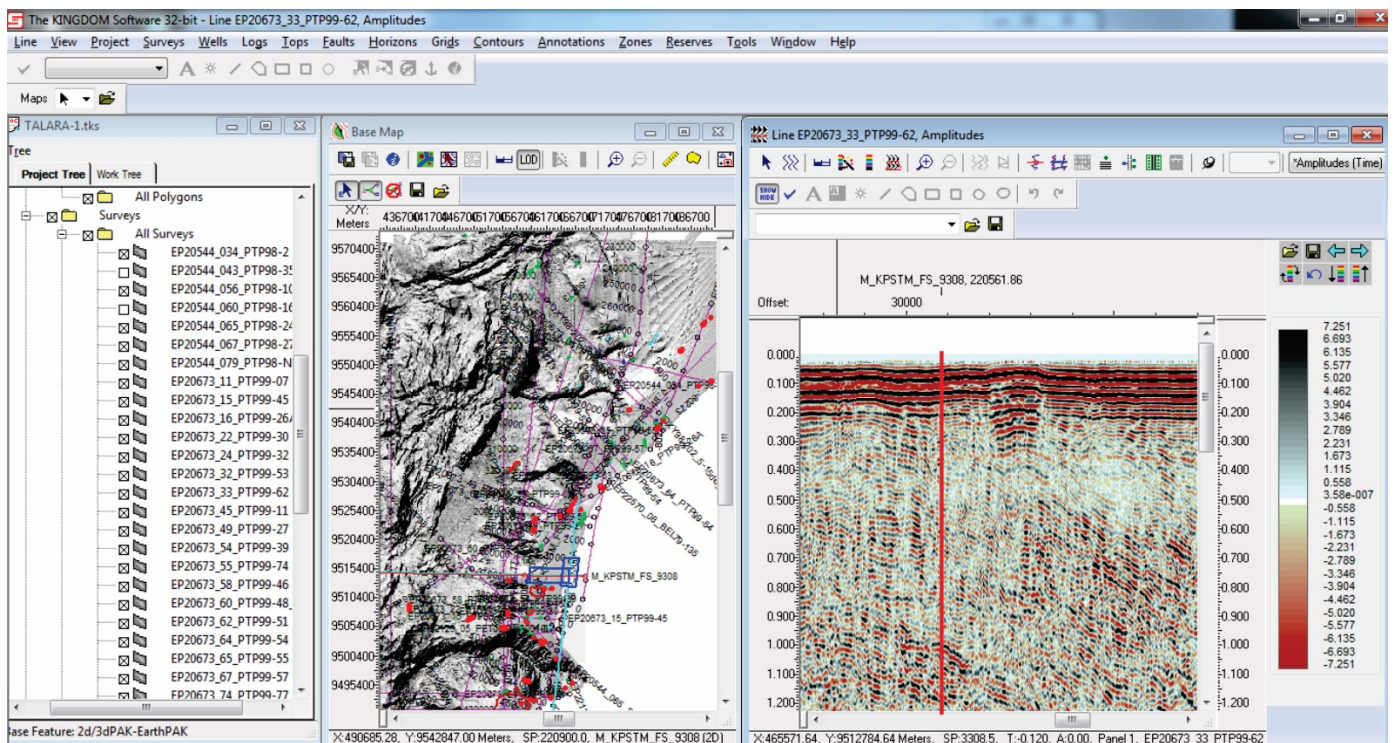


Figura 3.1 Proyecto de líneas de sísmica de reflexión multicanal construido en Kingdom Suite 8.6 para este trabajo con información que permite correlacionar la estructura sísmica del subsuelo con la morfología del fondo marino y la exacta localización de las emisiones de hidrocarburos.

Las estructuras relacionadas con migración de hidrocarburos (volcanes de fango, montículos, *pockmarks*, chimeneas de gas, zonas de falla, entre otros) se diferenciaron, observando la amplitud, frecuencia y continuidad de los reflectores sísmicos, con especial atención a zonas de reducción/incremento de amplitud, discontinuidades verticales, reflectores de simulación de fondo (BSR), cambios de polaridad, entre otros (Løseth *et al.*, 2009).

Con ello, se hicieron análisis específicos con las líneas PTP99-62, PTP98-24, NS-08 y RIBD93-08 (Cañón de Talara); PTP98-14 (próximo a Paíta); NS-08 y PTP98-00 (Cuenca Tumbes).

3.4 Plumas acústicas: emisiones submarinas de gas detectadas con sonda multihaz

La formación de plumas por expulsión de metano en el medio marino desde *pockmarks* y volcanes de fango es conocido desde hace más de tres décadas en el Mar Negro, Golfo de México, etc. Sin embargo, la identificación acústica de estas plumas ha evolucionado enormemente desde el empleo de los sistemas de ecosondas monohaz a los sistemas de ecosonda multihaz (Veloso *et al.*, 2015). La identificación de plumas acústicas en la columna de agua se basa principalmente en la detección de burbujas de metano y otros gases que

ascienden en la columna de agua y que presentan mayores impedancias que el agua. La reflectividad acústica, y así la detección de dichas burbujas, depende de a) el tamaño de las burbujas; b) la frecuencia utilizada; y c) el tipo de ecosonda (monohaz o multihaz). Las frecuencias utilizadas por ecosondas monohaz son de 38 y 200 kHz. Actualmente, las ecosondas de batimetría multihaz presentan un módulo de columna de agua que permite la visualización de plumas acústicas. La diferencia entre ecosondas monohaz radica en la cobertura de la columna de agua. Así, las ecosondas monohaz tienen un ángulo de cobertura entre 10 y 20°, mientras que las ecosondas multihaz, ángulos de 120°. De esta forma, los módulos de columna de agua de las sondas multihaz se muestran actualmente como una eficaz herramienta de detección de plumas acústicas procedentes de emisiones submarinas (Urban *et al.*, 2016).

La forma de las plumas acústicas observadas en los ecogramas depende, además de las frecuencias utilizadas y del tamaño de las burbujas, de la dirección del buque (Figura 3.2; Veloso *et al.*, 2015).

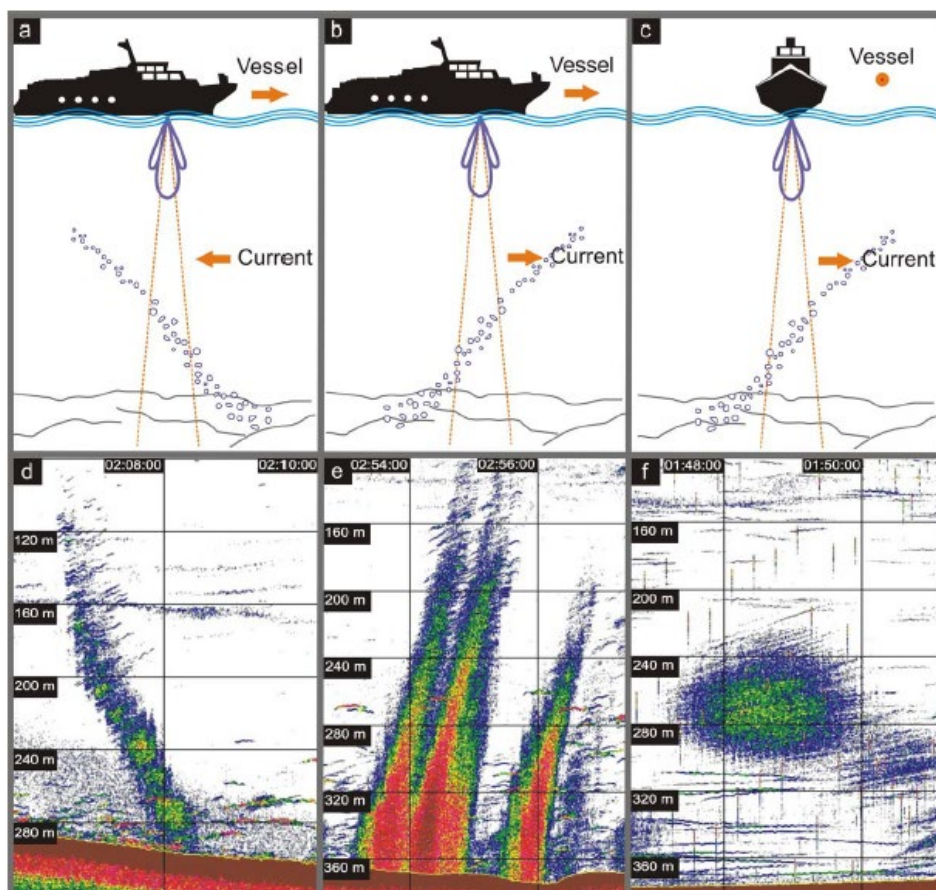


Figura 3.2 Formas de las plumas acústicas de las emisiones submarinas de gas en función de la dirección del buque (Veloso *et al.*, 2015).

La ubicación, altura e imágenes de las plumas acústicas proceden de GEOCATMIN, la plataforma geoespacial del INGEMMET. Dichos datos fueron obtenidos mediante la ecosonda

multihaz Kongsberg EM302 durante las campañas de Geología Marina INGEMAR I (de mayo a junio del 2016) a bordo del Buque de la Armada Peruana (BAP) Zimic de la Marina de Guerra del Perú (Ancco, 2019). La ecosonda multihaz Kongsberg EM302 opera a una frecuencia de 30 kHz cubriendo un ángulo de 120° de la columna de agua (Figura 3.3; Urban *et al.*, 2017).

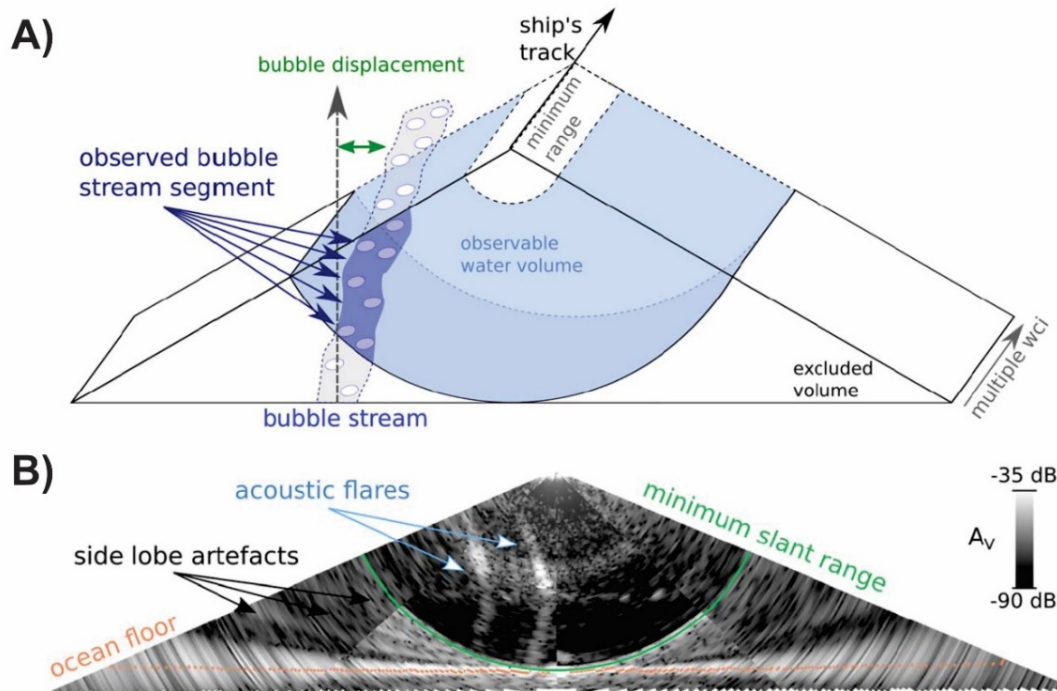


Figura 3.3 A) Esquema 3d con el efecto de la dirección del buque, y B) ecograma resultante de la columna de agua de la sonda multihaz EM302 mostrando plumas acústicas (Urban *et al.*, 2017).

Los datos acústicos de la ecosonda multihaz Kongsberg EM302 fueron procesadas mediante los softwares Echoview y Fledermaus. En la interpretación de las plumas acústica se han tenido en cuenta las siguientes características: a) la morfología y los tipos de plumas en relación con el movimiento del buque (Figuras 3.2 y 3.3); b) la repetitividad de las plumas y su proximidad con respecto a rasgos morfológicos del fondo marino indicadores de emisiones de gas como “*pockmarks*” o volcanes de fango; c) las diferencias que presentan con respecto a otras señales en la columna de agua como cardúmenes (con mayor variabilidad debido a su migración); y d) estructuras geométricas no consistentes que puedan reflejar ruido.

3.5 Software y edición

La base de datos de emisiones submarinas, cartografía morfológica, morfotectónica y otros recursos se representaron en mapas realizados mediante el sistema de información geográfica ArcGis 10.3. La batimetría regional utilizada (como imagen base) fue obtenida de GeoMapApp (<http://www.geomapapp>) y del Global Multi-Resolution Topography–GMRT (<https://www.gmrt.org>). Las líneas sísmicas fueron analizadas e interpretadas con el programa Kingdom Suite 8.6 y las figuras se editaron en Corel Draw X8.

La Figura 3.4 muestra, de manera resumida, el flujo de trabajo empleado.



Figura 3.4 Flujo de trabajo empleado para relacionar las geoformas submarinas con las emisiones de gas.

3.6 Limitaciones

Se pueden diferenciar dos grupos de limitaciones, las que corresponden a la adquisición de datos y las de procesamiento. El primero, se debe a que existe información dispersa obtenida con distintos objetivos y en distintos años. Por ejemplo, existen sectores con emisiones de gas sin información sísmica, sobre todo en la plataforma profunda. El segundo grupo de limitaciones está relacionado con el método de procesamiento de datos. Es frecuente encontrar cortada la parte superficial (y somera) de las secciones sísmicas, algunas relacionadas con geoformas submarinas y con posibles fugas de hidrocarburos, lo que genera que no pueda correlacionarse con el DEM. En otros casos no se cuenta con información de coordenadas en los archivos de las secciones sísmicas.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Morfoestructuras

En el extremo meridional de la Cuenca Talara se reconocen 3 mega-deslizamientos submarinos (MD1, MD2 y MD3, Figura 4.1) asociados a lineamientos E-O, en la zona de talud y hacia la plataforma profunda. En el mismo sector, el cambio de plataforma somera a talud, se produce por fallas normales lístricas. También existe una zona de relieve ondulado con lineamientos E-O en superficie, interceptados por otros de dirección NO-SE (a manera de rejilla) que en profundidad actúan como fallas normales relacionadas con la desestabilización de hidratos de gas (sección “a” del apartado 4.3.1). En el sector meridional y central de la cuenca Talara existen numerosas fallas y lineamientos E-O y ENE-OSO, que hacia el N del cañón de Talara cambian a ONO-ESE. En este último sector, en la plataforma somera, existen fallas lístricas que incluyen bloques rotados (sección “b” del apartado 4.3.1). En las secciones sísmicas, además, se observan fallas antiguas (algunas con reactivación) asociadas a cabalgamientos del basamento (Paleozoico al Cretácico).

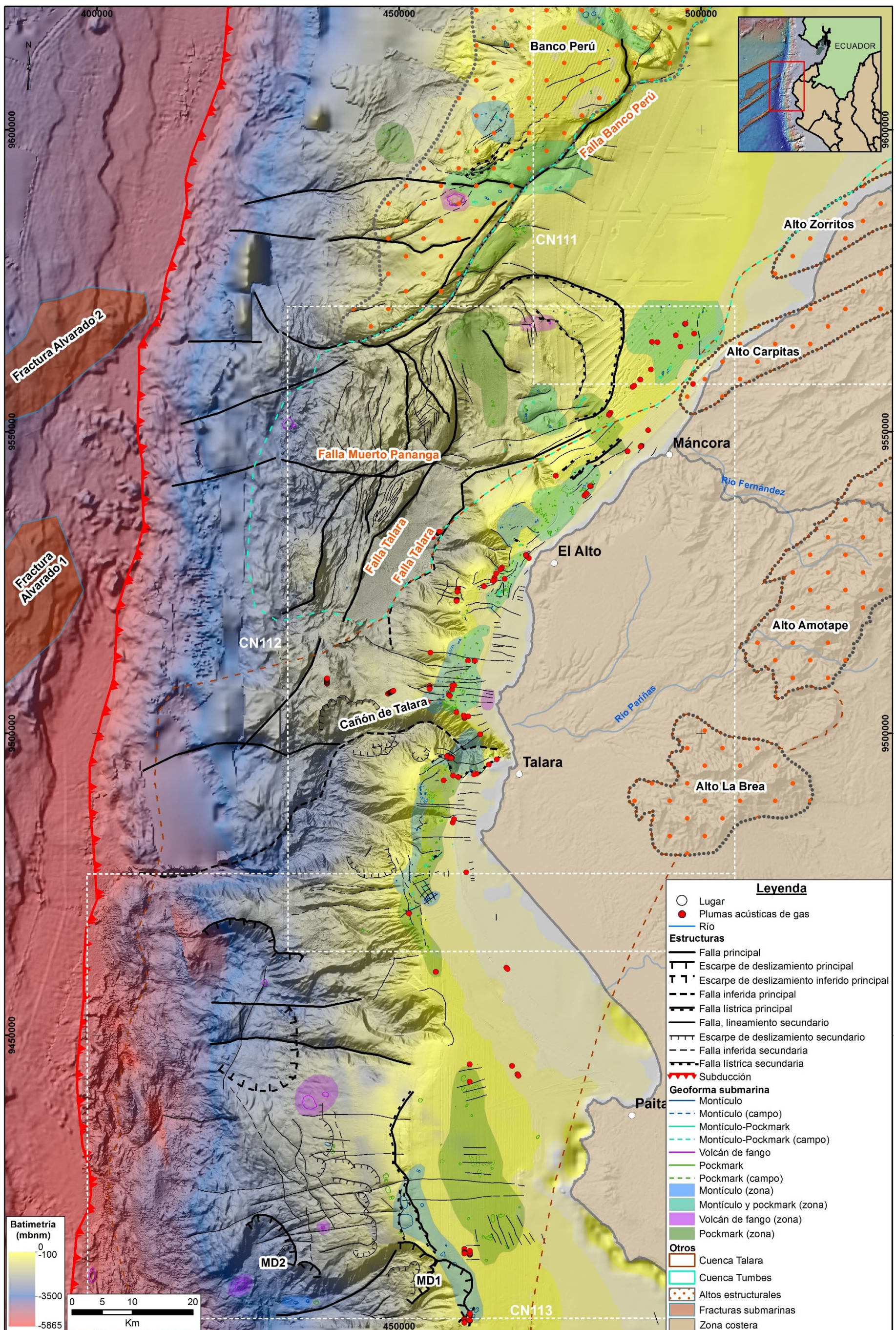
En la cuenca Tumbes, la morfoestructura está caracterizado por las fallas Talara (NE-SO), Muerto-Pananga (dirección E-O), Banco Perú (dirección NE-SO), que se prolongan con el sistema de falla transcurrente Dolores-Guayaquil, fallas transcurrentes E-O y NE-SO, y fallas normales circulares y rectas principalmente escalonadas (Figura 4.1, fallas gravitacionales por extensión de la cuenca). Estas últimas, llegan hasta la base de los sedimentos de la cuenca y actúan desde el Mioceno Medio (y tal vez Superior) hasta la actualidad.

4.2 Geoformas submarinas asociadas a escape de hidrocarburos

Se han reconocido y delimitado 617 geoformas submarinas que se agrupan en 28 zonas (Tabla 4.1, Figura 4.1). De éstas, la gran mayoría se encuentra en la plataforma somera y el talud continental. La Figura 4.2 muestra un ejemplo de las geoformas submarinas situadas en los alrededores del cañón de Talara.

Tabla 4.1 Geoformas submarinas identificadas en el modelo de elevación digital (DEM) submarino

Geoforma submarina	Cantidad	Agrupación de geoforma submarina (zonas)	Cantidad
Montículo	185	Montículo	8
Montículo- <i>Pockmark</i>	39	Montículo y <i>pockmark</i>	7
<i>Pockmark</i>	346	Volcán de fango	7
Volcán de fango	13	<i>Pockmark</i>	6
Montículo (campo)	7		
Montículo- <i>Pockmark</i> (campo)	3		
<i>Pockmark</i> (campo)	24		
Total	617	Total	28



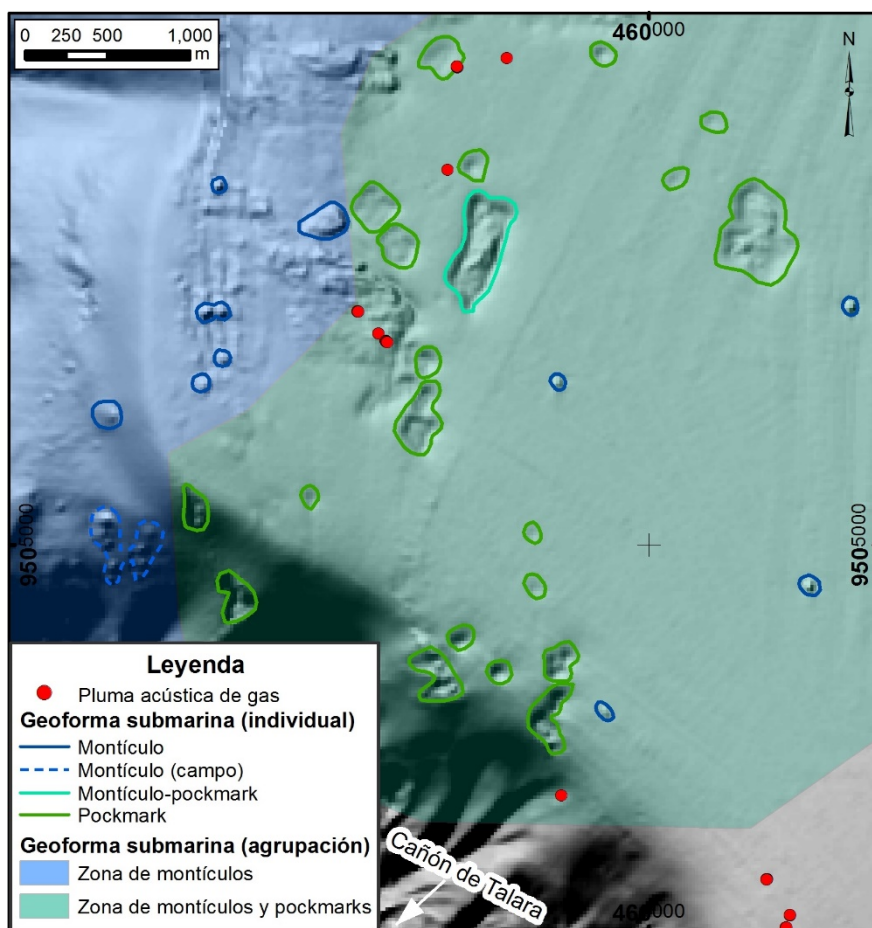


Figura 4.2 Montículos y *pockmarks* en el lado N del cañón de Talara (este trabajo).

4.3 Análisis de secciones sísmicas y escape de hidrocarburos

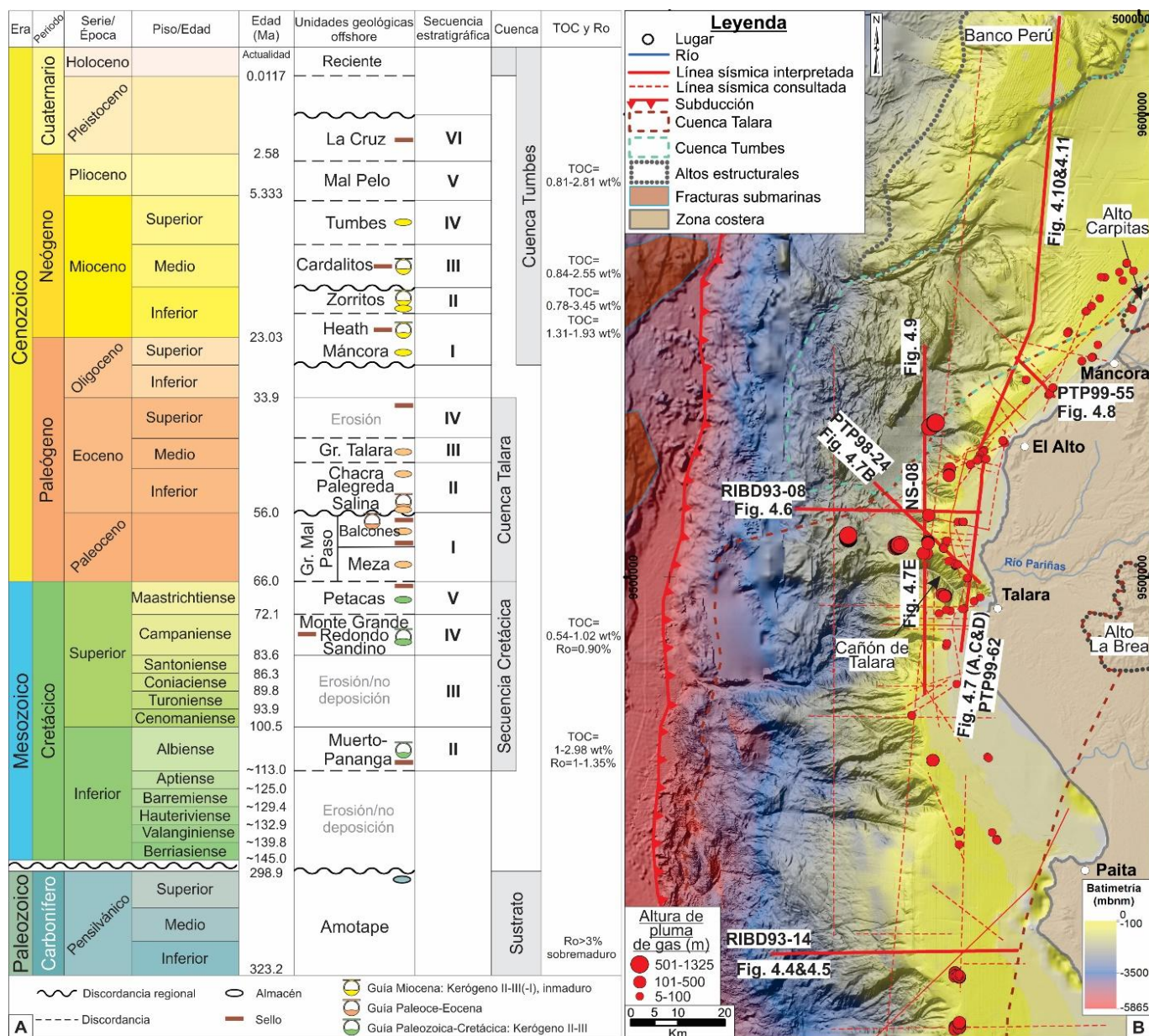
En la cuenca Talara se diferencian el basamento, Paleozoico (Fm. Amotapes), Cretácico, Paleoceno, Fm. Salinas, Fm. Chacra-Palegreda, Gr. Talara, depósito contornítico y depósito reciente; mientras que en la cuenca Tumbes se diferenciaron las Fms. Máncora, Heath, Zorritos, Cardalitos, Tumbes, Mal Pelo y La Cruz (Figura 4.3A). Las interpretaciones de 8 perfiles sísmicos representativos (Figura 4.3B): correspondientes a la cuenca Talara y se presentan en las Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9; mientras que los correspondientes a la cuenca Tumbes se muestran en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12.

4.3.1 Cuenca Talara

a) Oeste de Paita (margen continental S de la cuenca)

Unidades sismo-estratigráficas y características estructurales: En la sección E-O (Figuras 4.4 y 4.5) se diferenciaron nueve unidades sismo-estratigráficas, desde el basamento hasta depósitos recientes (incluyendo contornitas). En la plataforma continental somera, la secuencia paleozoica y el basamento y en menor medida la base de la unidad cretácica, están

fuertemente afectados por fallas de cabalgamiento. También se encuentran fallas normales (posteriores) que afectan a las secuencias paleocenas-eocenas.



Geoformas submarinas, conductos de migración y emisiones submarinas de gas: Se observan *pockmarks*, montículos y emisiones de gas submarino en la plataforma somera y en el talud superior. Las estructuras de emisión de hidrocarburos reconocidas son chimeneas de gas y “biconos sísmicos” (a 1.5 s de profundidad). Estos últimos se interpretan como un antiguo volcán de fango enraizados por conductos sísmicos a la unidad paleozoica (Figura 4.5A). Asimismo, se observa otro tipo de chimenea de gas enraizada en la unidad cretácica que aflora en superficie, dando lugar a campos de *pockmarks* y plumas acústicas de gas en la columna de agua de 20 a 214 m de altura, a profundidades de 140 a 287 m (PGN1281-

PGN1543, Figura 4.5A). Hacia el talud (Figura 4.5B) se identifica un nivel de BSR entre el límite Paleoceno-Salinas paralelo a la superficie, que muestra un gran contraste de impedancia (capas de gran amplitud positiva), relacionado con fluidos que provienen de la unidad cretácica. Estas anomalías de amplitud se interpretan como zonas de gas libre atrapado por debajo de la capa de hidratos de gas.

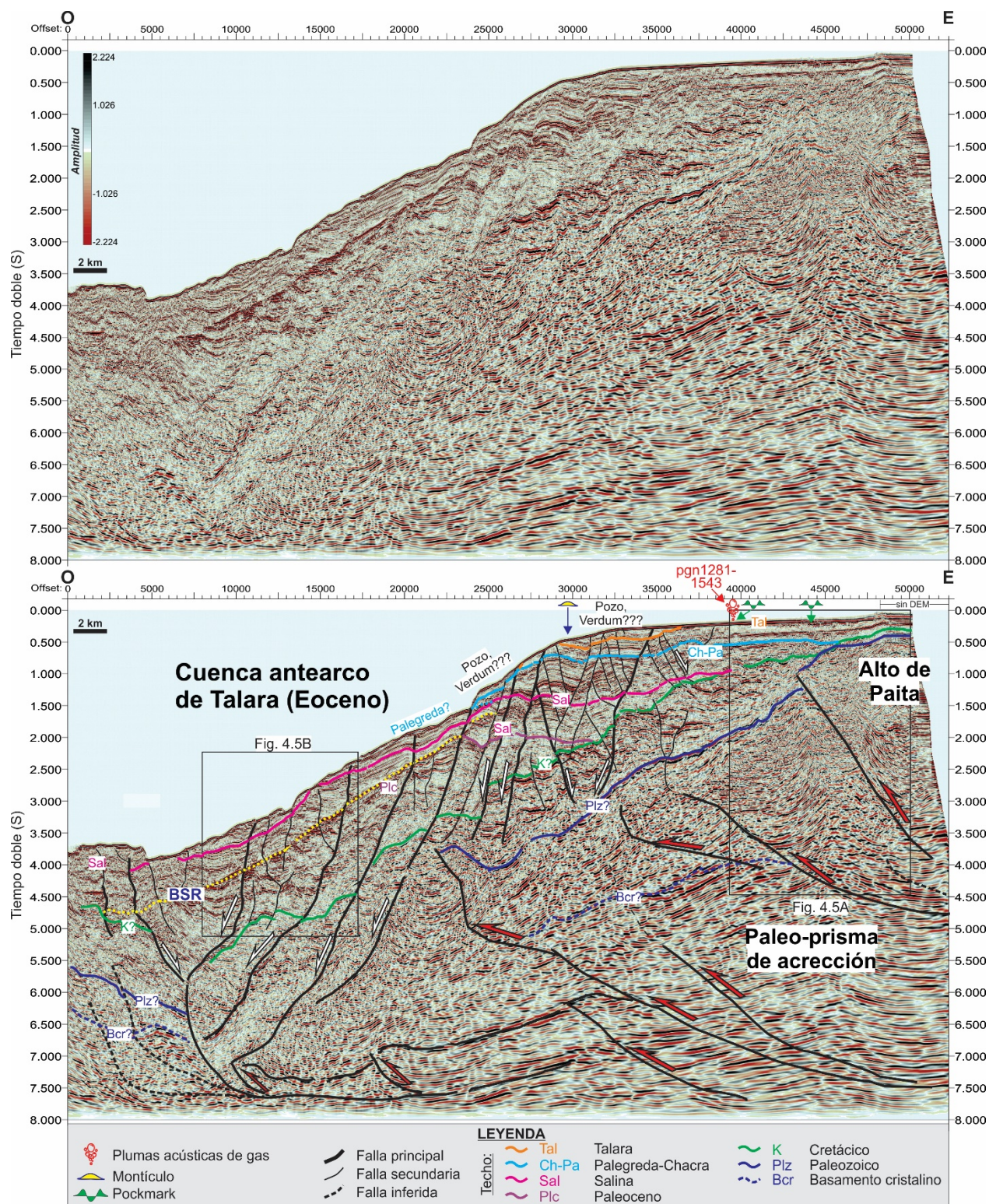


Figura 4.4 Estratigrafía y estructuras al S de la cuenca Talara (ubicación en la Figura 4.3B) (este trabajo).

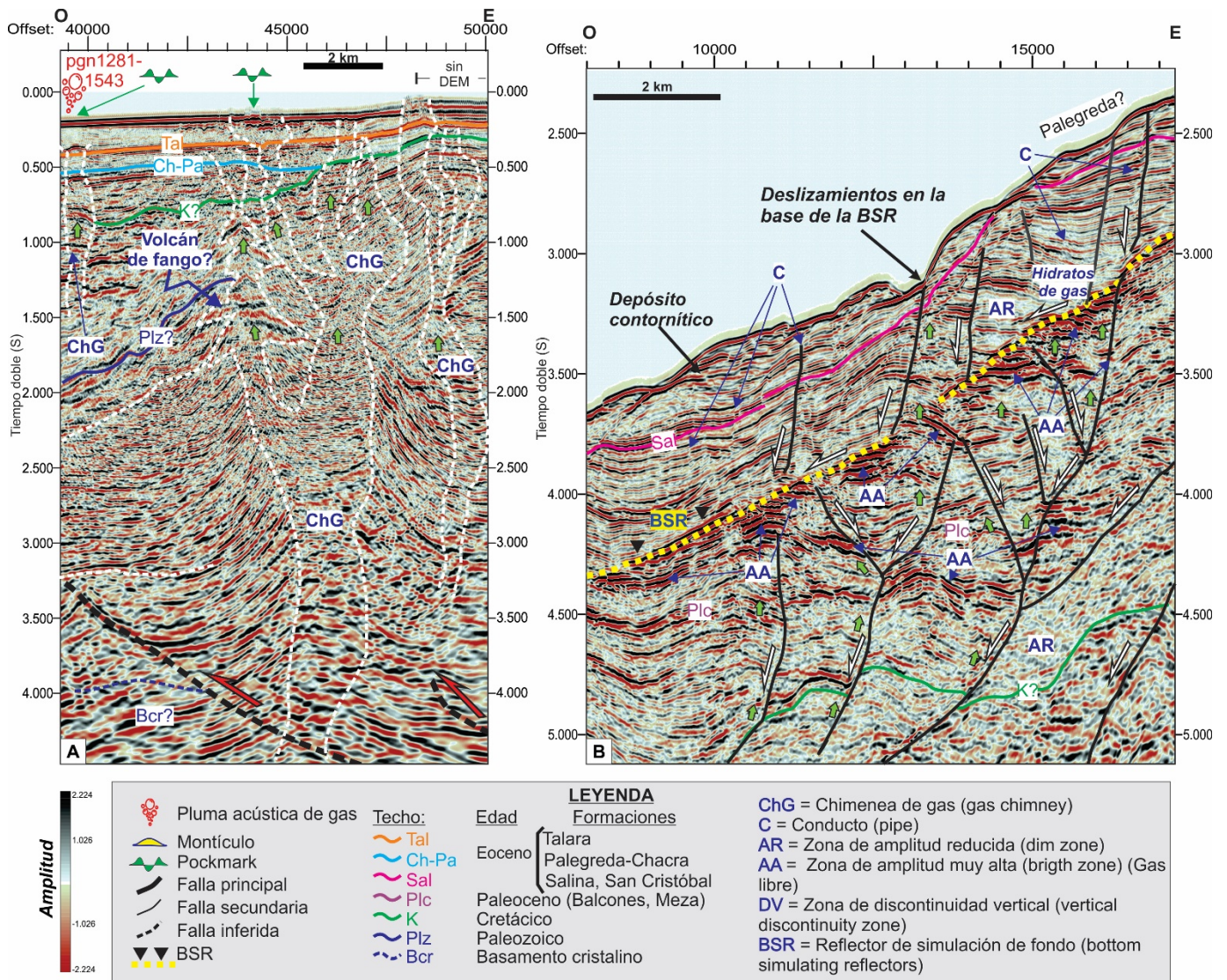


Figura 4.5 Estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos y BSR al S de la cuenca Talara (ubicación en la Figura 4.3B).

b) Cañón de Talara

Unidades sismo-estratigráficas y características estructurales: En la Figura 4.6, se diferencia en la plataforma somera la secuencia desde el basamento afectado por fallas de cabalgamiento hasta la Falla Talara (Fernández *et al.*, 2005), y el talud afectado por fallas lítricas de gran dimensión y que generan *rollover* en áreas más profundas.

Geoformas submarinas, conductos de migración y emisiones submarinas de gas: La zona presenta múltiples *pockmarks*, montículos y emisiones de gas, en particular cerca del borde de la plataforma somera y en el talud continental superior. Los conductos o estructuras de migración de hidrocarburos se diferencian por la presencia de: 1) chimeneas de gas en la plataforma somera enraizadas en la unidad Cretácica y Paleozoica que llegan a superficie (Figura 4.7B), asociadas a cabalgamientos del sustrato; 2) chimeneas de gas en la plataforma

somera enraizadas en la unidad Salina relacionadas con plumas acústicas de gas en el flanco del cañón submarino, *pockmarks* y campo de montículos (Figura 4.8A); 3) volcanes de fango en la unidad Cretácica (Figura 4.9) y Salina (Figuras 4.7B y 4.8B) que pueden llegar a superficie (aunque los hidrocarburos provienen del Paleoceno y muy probablemente del Cretácico, Figura 4.7A y 4.7B); y 4) chimeneas de gas en el talud enraizadas en la unidad Chacra-Palegreda con emisión de gas submarino (plumas acústicas de gas pg311 y pg372: altura de emisión de 281 y 264 m, profundidad de 435 y 599 m, respectivamente; Figura 4.8C). Por otro lado, también existen plumas acústicas de gas relacionadas con el sistema de fallas Talara (pg360: 109 m de altura de pluma de gas y profundidad de 509 m, Figura 4.6). Esto indica que la migración de hidrocarburos está controlada por las fallas y discontinuidades verticales, que favorecen el movimiento de hidrocarburos a través de éstas.

En el Lead Paleozoico profundo Lobitos (Fernández *et al.*, 2005), se reconocieron varias vías de migración de hidrocarburos que tienen como roca generadora principal el Cretácico (aunque los hidrocarburos pueden provenir del almacén paleozoico), y que llegan a la superficie de la plataforma como plumas acústicas de gas, montículos y *pockmarks*. La existencia de múltiples plumas acústicas de gas que se encuentran alrededor del cañón de Talara en el borde y flanco del cañón, relacionadas con fracturas y lineamientos E-O (Figuras 4.3B y 4.8D), reafirman el gran potencial de generación de hidrocarburos de dicho Lead.

Otro rasgo característico identificado, es un volcán de fango próximo al cañón de Talara, que funciona como conducto de bloques, lodos y fluidos que salen a superficie del fondo marino. Esta estructura muestra reflectores de bajo ángulo a cada lado de la parte cónica central (Figura 4.8B), y es de las más recientes al seguir desarrollándose sin-sedimentariamente en la Fm. Talara.

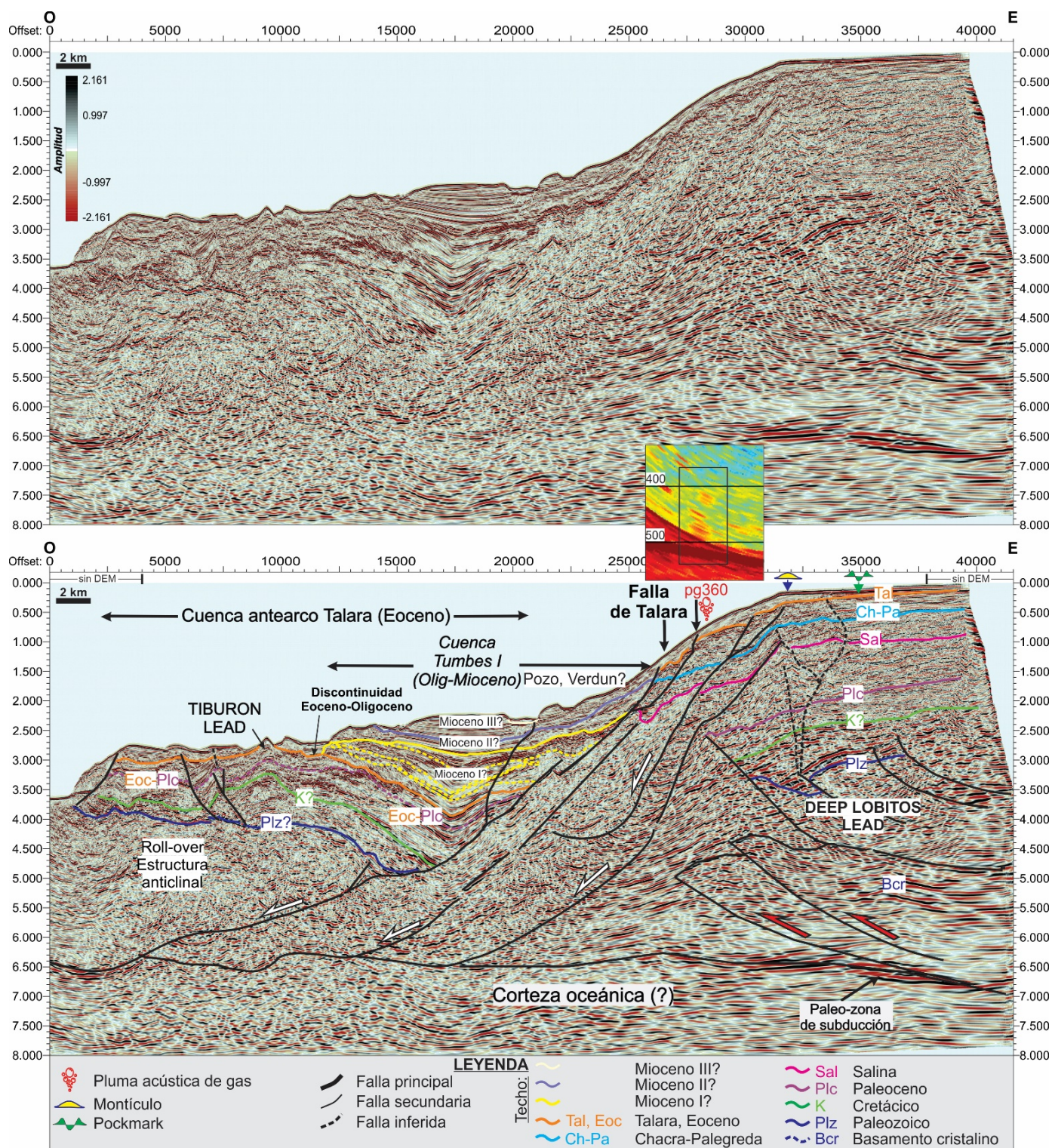


Figura 4.6 Estratigrafía y estructuras al N del cañón de Talara (ubicación en la Figura 4.3B). Interpretación modificada de Fernández *et al.* (2005), especialmente referente a las estructuras mesozoicas y paleozoicas. En esta sección se observa el comienzo de la cuenca de Tumbes que se desarrolla hacia el N.

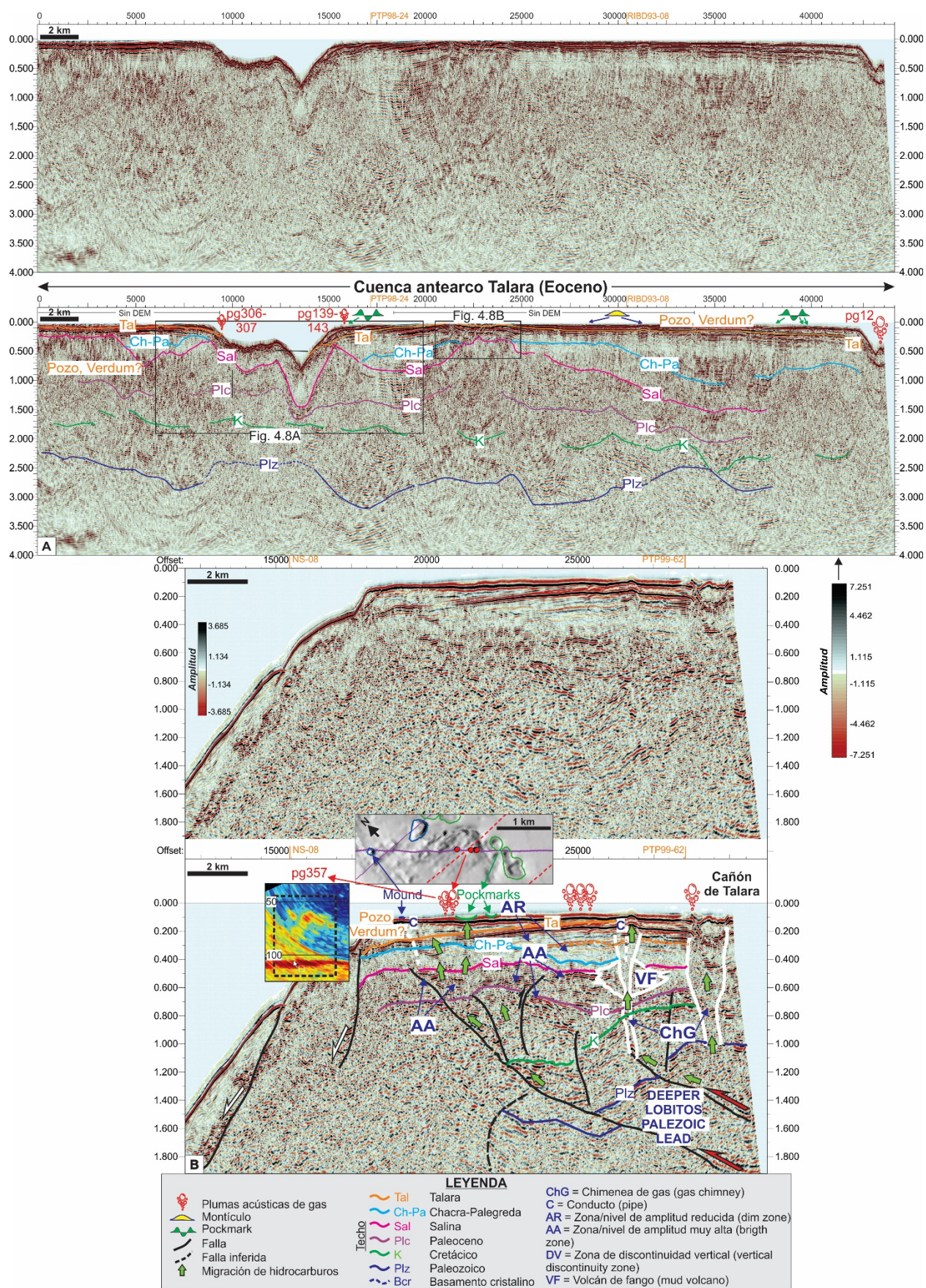
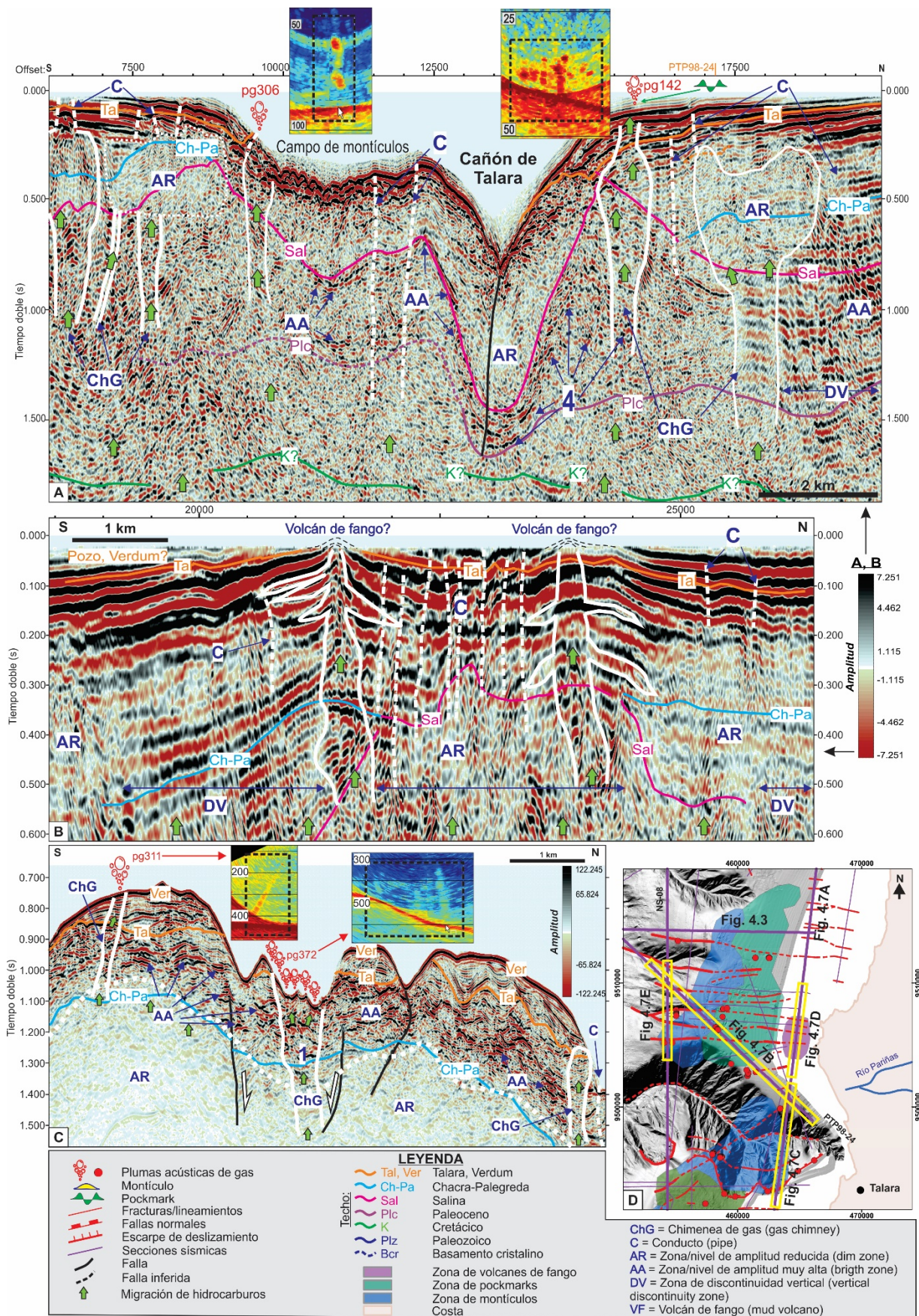


Figura 4.7 Perfiles sísmicos de multicanal donde se observan A) la estratigrafía en la plataforma y B) las estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos alrededor del cañón de Talara (ubicación en la Figura 4.3B y 4.8D) (este trabajo).



c) Sector Máncora-El Alto (offshore NO de la cuenca)

Unidades sismo-estratigráficas y características estructurales: Presenta la secuencia tipo desde el Cretácico (Figura 4.9). En la parte SE de la sección (plataforma somera), se observan fallas de cabalgamiento en profundidad que actúan hasta al menos la unidad paleocena; mientras que hacia el talud, aparecen fallas lítricas y bloques rotados que afectan a las secuencias paleocenas y más recientes. Estas fallas lítricas son cortadas por el sistema de fallas Talara.

Geoformas submarinas, conductos de migración y emisiones submarinas de gas: Los *pockmarks*, montículos y emisiones de gas relacionadas se encuentran en la plataforma somera. Las chimeneas de gas se enraizan en la unidad cretácica, pero son alimentadas también por la unidad Chacra-Palegreda. Las dos chimeneas de gas que se observan al SE de la sección están relacionadas con cabalgamientos y en superficie se asocian a una pluma acústica de gas (pg1: 45 m de altura y 64 m de profundidad, Figura 4.9). En la parte central de la sección, se observa otra chimenea que presenta una base conformada por un volcán de fango enterrado en la unidad cretácica. En estos sectores, y hacia el SE, desde la unidad paleocena, se observa una gran zona de discontinuidad sísmica (reflectores desplazados verticalmente de corta amplitud) que llega al techo de la unidad Talara. Al inicio del talud submarino se ubica otra chimenea que se desarrolla solo en la unidad Talara alimentada desde Chacra-Palegreda en una zona caracterizada por fallas lítricas.

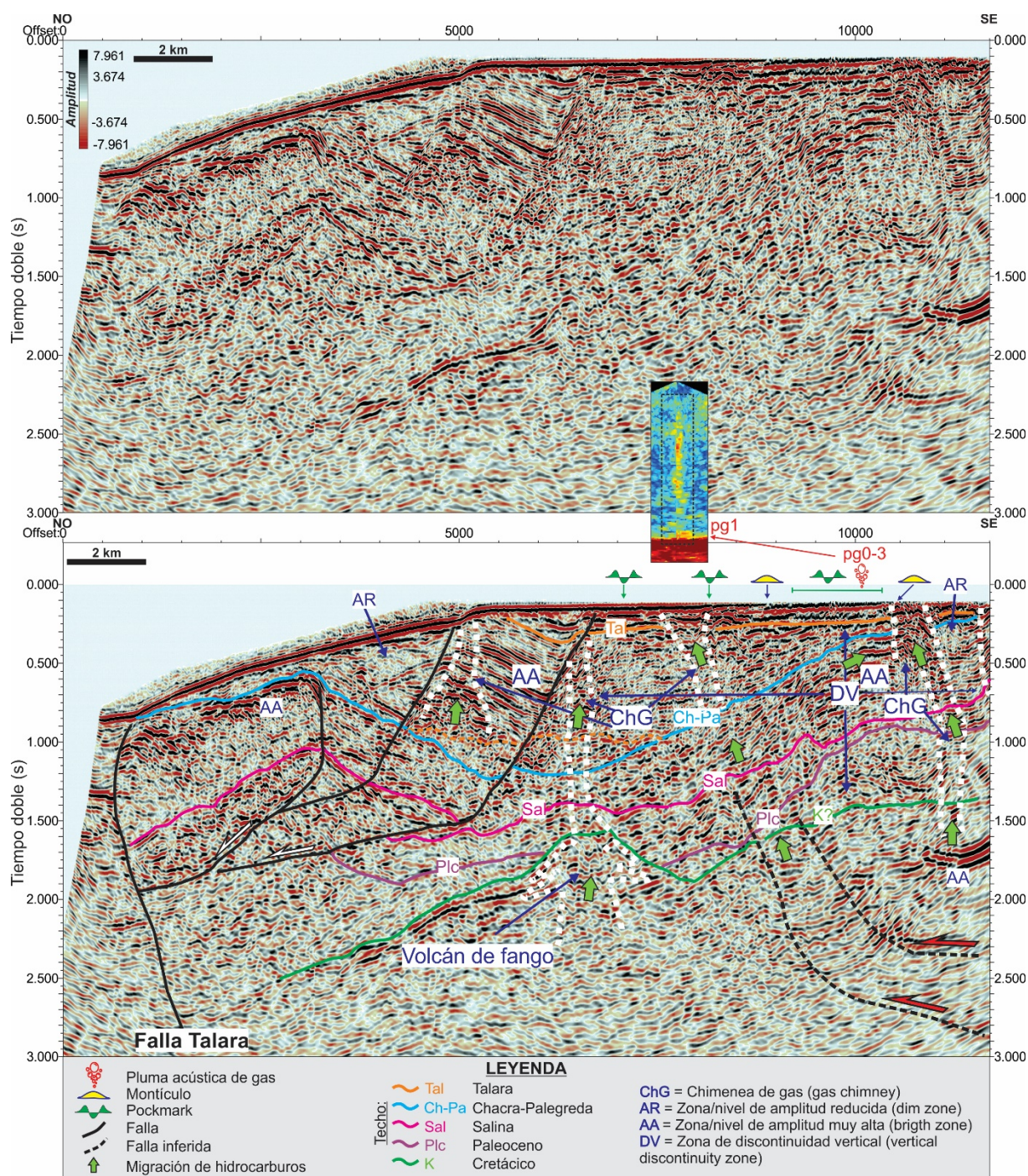


Figura 4.9 Estratigrafía y estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos en la plataforma entre Máncora y El Alto (ubicación en la Figura 4.3B) limitada por la falla de Talara como límite con la cuenca de Tumbes. El ecograma pg1 muestra la pluma acústica de gas vertical en color rojo (obtenido con sonda multihaz) (este trabajo). Los campos de pockmarks y plumas de gas identificados en la plataforma interna están relacionados con reservorios (AA) en los frentes de cabalgamientos de las unidades paleozoicas y mesozoicas. En la plataforma externa y talud superior, las emisiones esta relacionadas con las fallas lístricas de la cuenca eocena de Talara.

4.3.2 Cuenca Tumbes

a) Sur de la cuenca

Unidades sismo-estratigráficas y características estructurales: Se reconoció la secuencia completa de la cuenca Tumbes depositada sobre una unidad Eocena indiferenciada de la cuenca Talara (lado S de la sección) y sobre el sustrato Paleozoico (lado N de la sección). La secuencia se encuentra delimitada por el sistema de fallas Talara (con dirección NE-SO) y Muerto-Pananga (con dirección E-O). La secuencia oligocena-pleistocena no está afectada por fallas.

Geoformas submarinas, conductos de migración y emisiones submarinas de gas: En la superficie del fondo marino no se observan geoformas, pero sí una pluma acústica de gas en la plataforma profunda. Se identificaron dos chimeneas de gas principales en el lado S enraizadas en la unidad eocena, una de ellas llega a un paleocanal y es el que funciona como conducto de la emisión pg416 (pluma de gas de 1300 m y una profundidad de 1739 m). Existen otras chimeneas de gas y conductos más pequeños (discontinuidades) que llegan a la base de la unidad Tumbes desde la unidad Heath (Figura 4.10).

b) Centro de la cuenca

Unidades sismo-estratigráficas y características estructurales: Hacia el centro de la cuenca, la serie completa se deposita sobre el Paleozoico, donde se observan 3 depocentros, siendo el del S el menos potente y el que contiene sedimentos desde la unidad Tumbes (Figura 4.11). La cuenca está limitada por los sistemas de falla de Talara y Banco Perú, en donde también se observan fallas de basamento y numerosas fallas normales (algunas conectadas al sustrato) debido a la apertura constante de la cuenca que se mantiene incluso en la actualidad. En el lado S de la sección, se observa que los depósitos de la cuenca Talara convergen hacia el N con una interrupción a causa del sistema de falla de Talara.

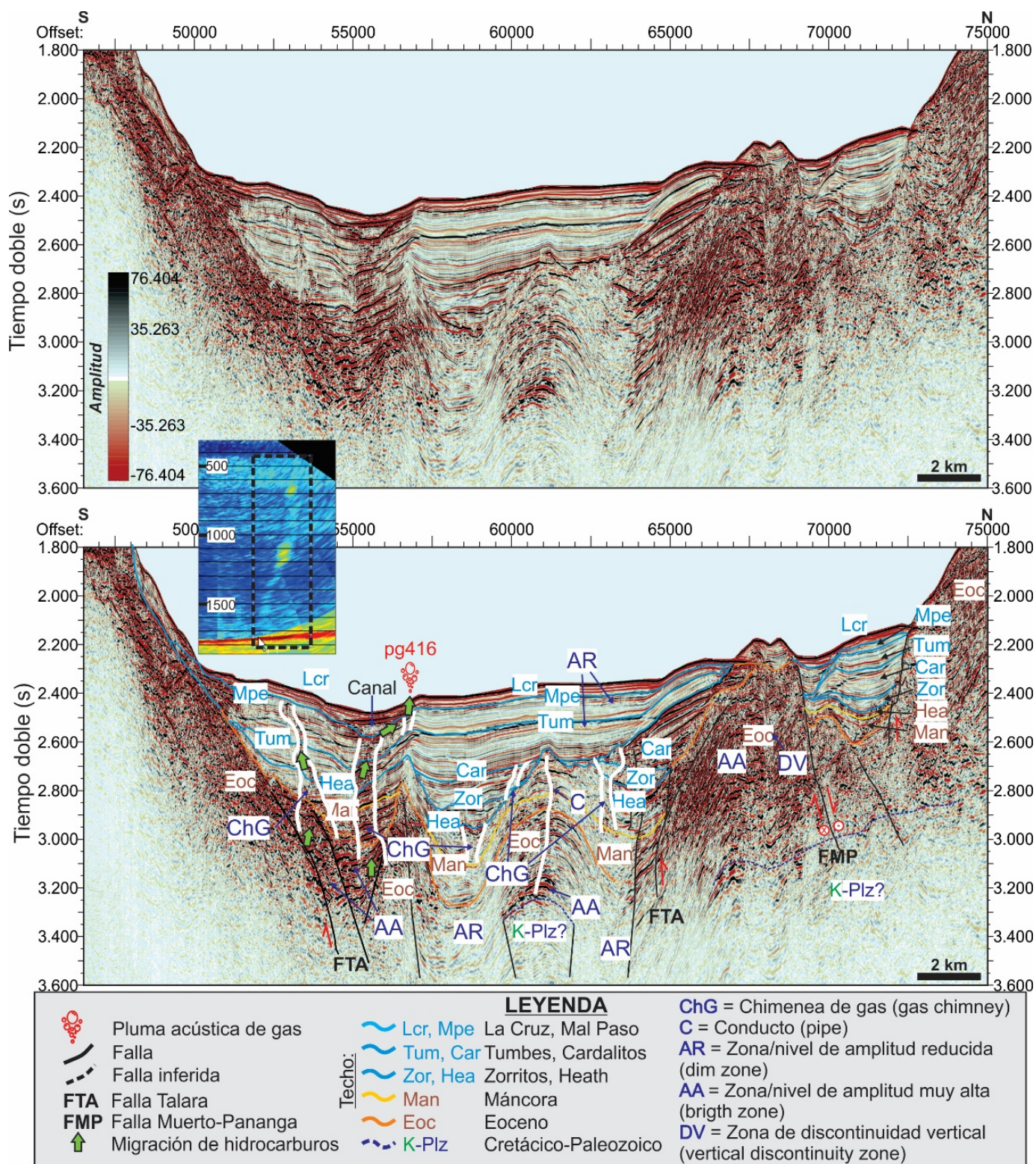


Figura 4.10 Estratigrafía y estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos en el sector S de la cuenca Tumbes generada por el juego de fallas de Talara (FTA) a lo largo del talud continental y de Muerto-Pananga (FMP) transversal al talud (ubicación en la Figura 4.3B) (este trabajo).

Geoformas submarinas, conductos de migración y emisiones submarinas de gas: Se registran *pockmarks* y montículos a lo largo de la sección. Se reconocieron chimeneas de gas en 3 sectores: 1) en el Banco Perú en depósitos cretácicos (Figura 4.11); 2) en la unidad Zorritos-Cardalitos-Tumbes (centro de la Figura 4.11 y 4.12); y 3) en el lado S de la cuenca en la secuencia Tumbes-Mal Pelo-La Cruz (Figura 4.11). En el Banco Perú, los hidrocarburos migran al menos desde las secuencias cretácicas más profundas a través de las chimeneas de gas, mientras que en la cuenca Tumbes el desplazamiento de hidrocarburos se realiza también por fallas y discontinuidades. En este último, la migración resulta de una combinación de las unidades Heath-Zorritos-Cardalitos (y posiblemente desde el Paleozoico) en los depocentros Tumbes II y III. Otra evidencia de la existencia de hidrocarburos, son los niveles de hidratos de gas observados como BSR, a manera de capas concordantes con la sedimentación (Figuras 4.11 y 4.12). Los niveles de BSR están alimentados por hidrocarburos que ascienden desde la unidad Heath a través de las fallas normales y discontinuidades (Figura 4.12B) y también por chimeneas de gas (Figura 4.12A). Finalmente, por encima de los niveles de BSR, los sedimentos se encuentran removidos (reflectores ondulados distintos a la sedimentación) hasta la base de los depósitos recientes, indicando que actuaron como vías de migración que no llegan a alcanzar la superficie del fondo marino y se almacenan en las capas superiores (como una capa con alta amplitud indicando almacenamiento de hidrocarburos, Figura 4.11). En otros casos, durante su ascenso, los hidrocarburos migran lateralmente hacia los bordes de la cuenca a favor de la estratificación (Figura 4.12). En esta zona, que corresponde a la carta náutica 111, no se ha realizado campañas de reconocimiento de plumas acústicas de gas.

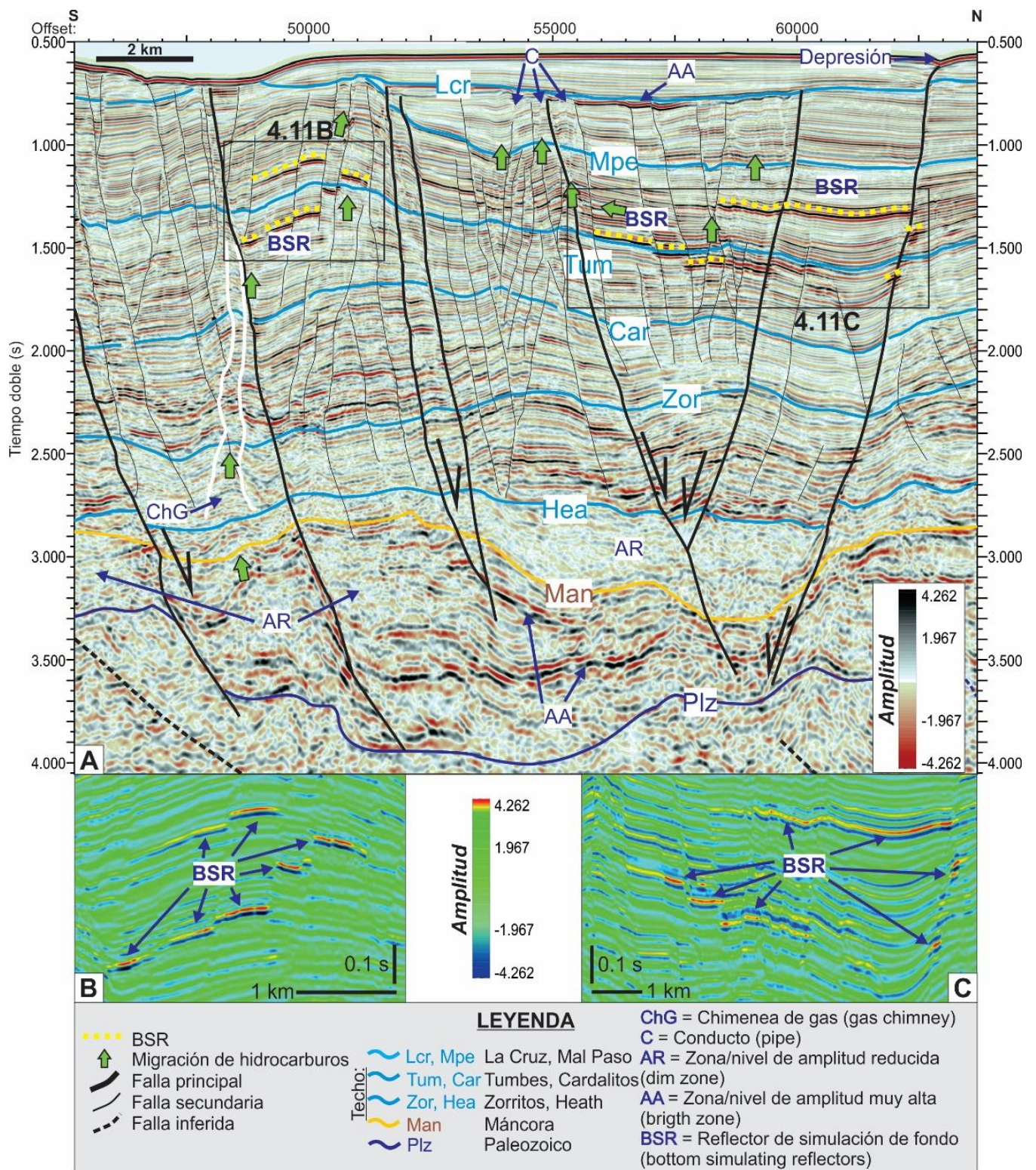


Figura 4.12 Estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos y BSR en la cuenca Tumbes (ubicación en las Figuras 4.3B y 4.11) (este trabajo).

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

5.1 Geoformas submarinas de fondo marino

El análisis de los mapas batimétricos ha permitido la identificación de diferentes estructuras asociadas a escapes de hidrocarburos y su cartografía (Figura 4.1), así como su correlación con la distribución de plumas acústicas detectadas con sondas batimétricas multihaz. Esta correlación nos permite determinar qué estructuras presentan emisiones activas. No obstante, al tener el modelo de elevación digital (DEM) en formato GeoTiff, el reconocimiento de las geoformas submarinas relacionadas con la migración de hidrocarburos, está condicionado por el tamaño de pixel de la batimetría de las cartas náuticas 111, 112 y 113, y el ángulo de inclinación de la sombra. Esto hace que no se puedan reconocer con precisión los montículos, *pockmarks* y otras geoformas que sean de tamaño menor que el del pixel, que estén agrupados en muy pocos pixeles o que estén afectados por el efecto de sombra. A pesar de esta limitación, se reconocieron las geoformas más visibles, que también se observan en las secciones sísmicas, haciendo que la delimitación realizada tenga gran consistencia. En el área cubierta por la carta náutica 111 no se realizaron campañas de reconocimiento de plumas acústicas de gas. Sin embargo, por las geoformas y estructuras reconocidas, existe un gran potencial de encontrar emisiones de gas submarino en futuras campañas de exploración.

Por otro lado, las zonas sin información de DEM, como el volcán de fango próximo al cañón de Talara (Figura 4.8B); pueden presentar evidencias de geoformas submarinas importantes cerca de la costa.

5.2 Estructuras de fuga de hidrocarburos y contexto tectono-sedimentario del offshore de las cuencas Talara y Tumbes

El análisis de las geoformas submarinas de superficie y las estructuras relacionadas con la migración de hidrocarburos en las secciones sísmicas, permiten diferenciar 3 contextos hidrocarburíferos (sistemas petrolíferos) que están asociados con la evolución tectono-sedimentaria del NO del margen continental del Perú y que a continuación se desarrollan.

5.2.1 Sistema 1: Cuenca mesozoica de Talara, paleo-prisma de acreción (Cretácico-Paleozoico Leads)

Este sistema está formado por cabalgamientos profundos de bajo ángulo que afectan a las formaciones paleozoicas y cretácicas principalmente. Estos cabalgamientos representan el antiguo prisma de acreción, de forma que los Altos paleozoicos de Zorritos, Carpitay y Amotapes (actualmente situados sobre la costa), corresponden a los antiguos frentes de cabalgamiento de la plataforma continental.

Las potenciales fuentes de generación de hidrocarburos son las Fms. Redondo (Cretácico Superior) y Muerto-Pananga (Albiense, Cretácico Inferior), aunque también pueden provenir del reservorio paleozoico. La formación Redondo contiene kerógenos tipo I y II con valores de TOC típicos alrededor del 1 wt%. La formación Muerto-Pananga contiene excelentes contenidos orgánicos de kerógenos tipo I y II-III con valores de TOC entre 1 y 1.35% (Fernández *et al.*, 2005). Los sedimentos paleozoicos son post-maduros con Ro wt% por encima de 3.0.

Los conductos de migración desde las áreas fuentes al fondo marino, están formados por grandes columnas de chimeneas acústicas y volcanes de fango que conectan los cabalgamientos profundos con la superficie (Figuras 4.5A, 4.7B y 4.9). Estos conductos, en la superficie del fondo marino se relacionan con *pockmarks*, montículos y plumas acústicas de gas, sobre todo en la plataforma somera. Las emisiones submarinas relacionadas con este sistema Paleozoico-Mesozoico se observan principalmente en la plataforma interna entre Negritos y Máncora asociados con los Altos de Carpititas y Zorritos, y en la plataforma interna de Paita asociados a los Altos de Paita y Amotape.

En este sistema, el área con mayor número de plumas acústicas de gas se localiza en la plataforma interna alrededor del cañón de Talara. Esto debido probablemente a que este cañón incide y erosiona los reservorios cretácicos y paleozoicos. El cañón de Talara se encuentra en la periferia de la Cocina Malacas (Figura 5.1), donde también predominan las fracturas y lineamientos E-O. Por lo tanto, es un área de emisión activa de hidrocarburos con gran potencial de exploración. La zona de volcán de fango de la misma figura, coincide con la zona de menor profundidad del tope del Paleozoico.

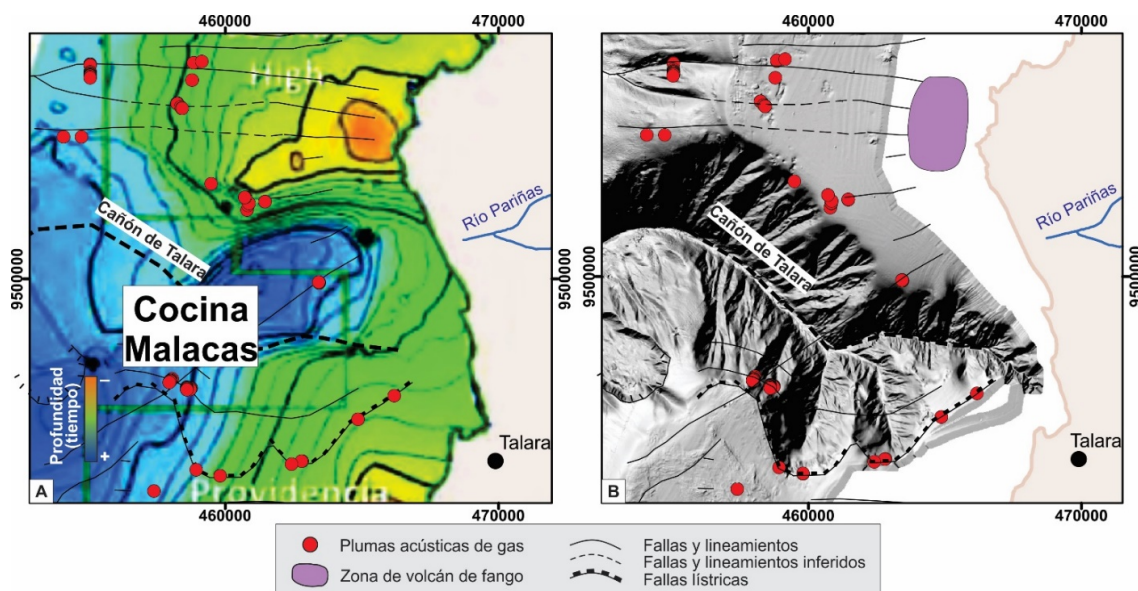


Figura 5.1 Plumas acústicas y zona de volcán de fango en los alrededores del cañón de Talara (este trabajo) relacionadas con la Cocina Malacas (rocas generadoras principalmente cretácicas). A) Profundidad del tope del Paleozoico (Andamayo & Fuentes, 2015) y B) Imagen del modelo de elevación digital.

5.2.2 Sistema 2: Cuenca cenozoica de Talara, cuenca antearco (Paleoceno-Eoceno Leads)

El sistema está formado estructuralmente por grandes fallas lístricas de bajo ángulo con buzamiento hacia el mar donde se desarrolla sin-sedimentariamente la secuencia eocena desde la unidad Salina hasta posiblemente las unidades Verdum o Pozo. Estas fallas lístricas de bajo ángulo se desarrollan entre la plataforma externa y el talud continental superior desde Máncora hasta el Alto Illescas (hacia el S). Desde la falla Lagunitos-Huaypira hacia el N, la estructura de fallas lístricas de la cuenca de Talara está modificada por el posterior desarrollo de los desgarres dextrales de las fallas de Talara, Muerto-Pananga y del Banco Perú en la megacizalla de Dolores-Guayaquil.

La migración de fluidos de este sistema de cuenca antearco tiene lugar desde las unidades eocenas a través de conductos asociados a los sistemas de fallas normales, tanto sintéticas como antitéticas (como la pluma acústica de gas pg360, Figura 4.6). En otros sectores los fluidos migran también desde el Cretácico (y tal vez desde el Paleozoico). En el S de la cuenca Talara, las fallas gravitacionales conectan con niveles de hidratos de gas (BSR de la Figura 4.5B) que originan deslizamientos en el talud originados por la disociación de la base de los hidratos de gas que actúan como plano de deslizamiento. Las cicatrices de estos grandes deslizamientos se reflejan tanto en la morfología del talud continental como en la de la costa, dando lugar a bahías como las de Paita y de Bayovar. La disociación en la base de la BSR en el margen peruano puede deberse a cambios en las condiciones de presión y temperatura causados por: 1) procesos oceanográficos de variación de las corrientes relacionadas con los eventos de El Niño; y 2) procesos sismo-tectónicos relacionados a la alta actividad sísmica en la zona. Por otro lado, la disociación de los hidratos de gas y la consecuente generación de grandes deslizamientos en el talud pueden ser, a su vez, importantes causas de tsunamis (numerosos en la zona).

Las chimeneas de gas se originan en secuencias paleocenas, las unidades Salina y Chacra-Palegreda, que se extienden hasta la superficie (Figuras 4.8A, 4.8C y 4.9). Si se desarrollan en las secuencias más superficiales en la plataforma somera (próxima al talud), en superficie no se evidencia ninguna geoforma submarina ni emisiones de gas (como ocurre en la estructura situada a una distancia (*offset*) de 5000 m y a 0.8 s en la Figura 4.9). Si las chimeneas de gas se encuentran en la plataforma somera (próximas al talud) o en el talud, y están conectadas a secuencias cretácicas y paleozoicas, se observan numerosas emisiones, *pockmarks* y montículos (Figuras 4.8A y 4.8C).

5.2.3 Sistema 3: Cuenca transtensional de Tumbes (Oligoceno Superior-Mioceno Leads)

Este sistema es característico de la cuenca Tumbes y está formado por fallas de desgarre oblicuas de carácter dextral que forman cuencas transtensionales y grandes depocentros desde el Mioceno hasta la Actualidad.

Las emisiones de gas están relacionadas con conductos subverticales formando estructuras en flor de la falla Talara en el S, y con las fallas de Muerto-Pananga y del Banco Perú en el N. Las emisiones se enraízan con reservorios eocenos en el sector S de la cuenca de Tumbes I y con las Fms. Heath y Mancora (Oligoceno, Figura 4.10). Las fallas normales subverticales, llegan a afectar hasta el Paleozoico y crean múltiples discontinuidades y conductos favorables para la migración de hidrocarburos. Éstos, generan hidratos de gas en las unidades Tumbes y Mal Pelo (Figura 4.12).

Tradicionalmente la cuenca de Tumbes se ha asociado con la migración del prisma de acreción hacia el NO, siguiendo el mismo proceso que la cuenca de Talara (Espurt *et al.*, 2018 y otros autores). Sin embargo, la correlación entre las fallas transformantes de la placa oceánica de Nazca (fracturas submarinas Sarmiento y Alvarado 1 y 2) y las fallas de desgarre dextrales (Falla de Lagunitos-Huaypira, Muerto-Pananga y Cardalitos) del NO del margen continental peruano definidas a partir del mapa morfotectónico, demuestran que las segundas son continuidad de las primeras, respectivamente (Figura 5.2).

Como consecuencia del progresivo rejuego de las fallas transformantes de la Placa de Nazca desde el S (Sarmiento) hacia el N (Alvarado 1 y 2), los depocentros de la Cuenca de Tumbes, que en este trabajo se plantean como Tumbes I, II y III, migran progresivamente también hacia el N (Figura 5.2).

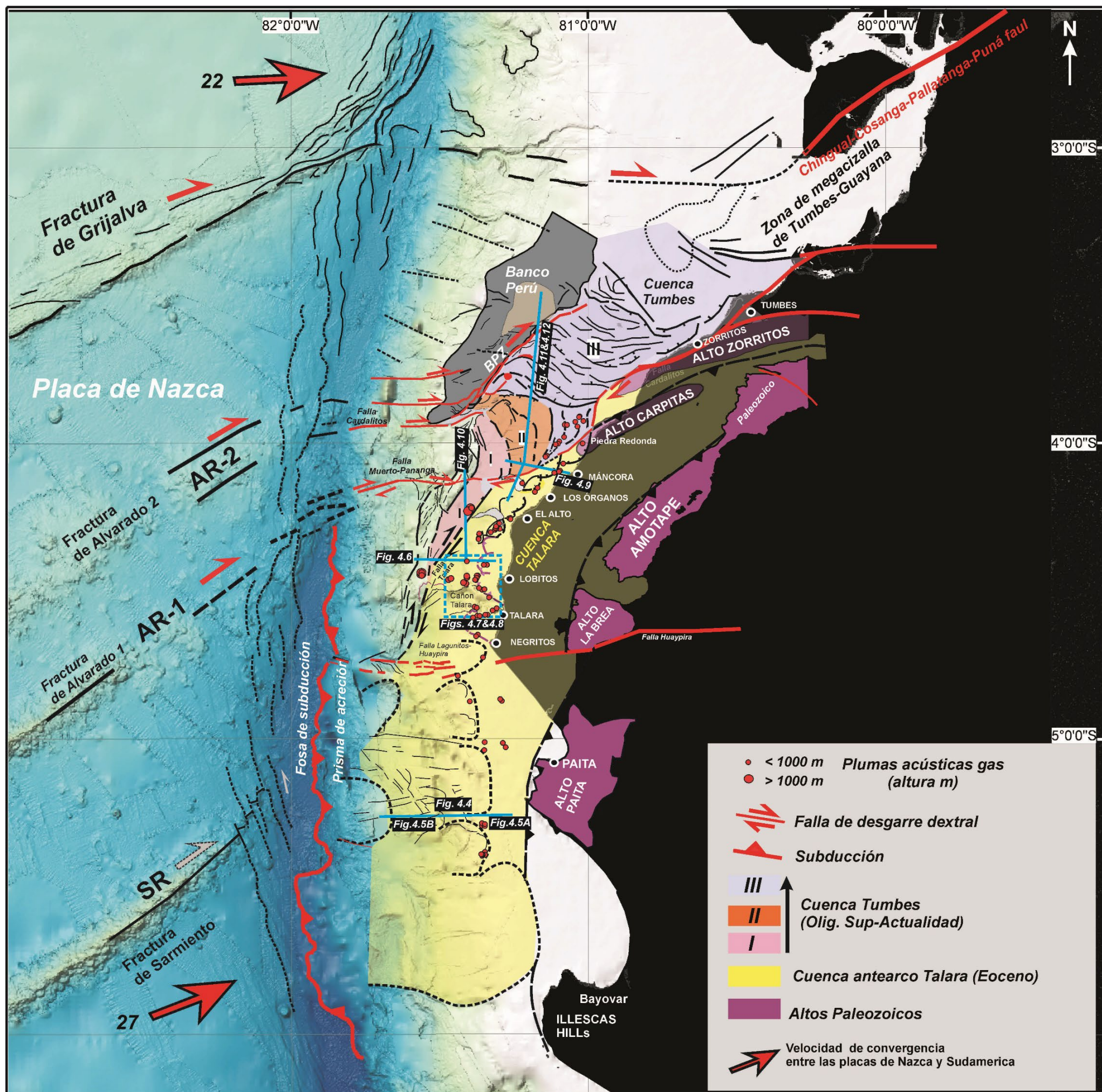


Figura 52 Fracturas submarinas y altos estructurales responsables de la configuración y evolución de las cuencas Tarma y Tumbes (este trabajo). Datos de convergencia de la placa oceánica (mm/año) de Gripp & Gordon (2002). Altos estructurales y cuencas modificado de Espurt et al. (2018).

a) Subcuenca Tumbes I:

Se genera por el funcionamiento de la falla dextral Talara, de orientación N-S casi paralela al margen continental y que se extiende desde el cañón submarino de Talara hasta el Banco de Perú. En este sentido el cañón submarino de Talara es desviado hacia el sur por esta falla de desgarre. La cuenca Tumbes I está formada por sedimentos del Oligoceno Superior-Plioceno desde la Fm. Mancora y Heath (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior) hasta la Fm. Mal Pelo (Plioceno). La discontinuidad entre la Fm. Cardalitos (Mioceno Medio) y la de Tumbes (Mioceno Superior, Figura 4.10) muestra la edad de irrupción de la falla dextral E-O Muerto-Pananga, causada por la prolongación de la falla transformante de Alvarado-1.

Los sedimentos con materia orgánica son comunes en las formaciones de Heath, Zorritos y Cardalitos con excelente generación de hidrocarburos desde el tipo II al tipo III, y en menor proporción del tipo I. Las emisiones submarinas en la cuenca Tumbes I alcanzan más de 1000 m de altura sobre el fondo marino y se localizan asociadas a la falla de Talara (FTA en Figura 4.10), una estructura en flor que limita el margen de la cuenca Tumbes I (Figura 4.10). Los conductos relacionan estas emisiones submarinas con hidrocarburos del reservorio de la Fm. Máncora (Oligoceno Superior), y muy probablemente también de las formaciones infrayacentes eocenas y mesozoicas de la cuenca de Talara (Figura 4.10).

b) Subcuencas Tumbes II y III

Las dos subcuencas, Tumbes II y III, se generan por el movimiento de dirección N-90° de las fallas dextrales de Muerto-Pananga y de Cardalitos, por prolongación del movimiento de las fallas transformante de Alvarado 1 y 2 en la corteza oceánica de Nazca, respectivamente. La cizalla generada por ambas fallas dextrales sobre el margen continental da lugar a una cuenca transtensiva, en continuidad con la cuenca Tumbes I, y con importantes depocentros migrando hacia el NE (Figura 4.11).

Las cuencas de Tumbes II y III muestran en superficie, geoformas de emisiones de fluidos (*pockmarks* y montículos) relacionadas con sistemas de relevo de las fallas de desgarre dextrales del Banco Perú (continuación de la falla de Cardalitos) y de Muerto-Pananga (Figura 5.2). Asimismo, la migración de fluidos con hidrocarburos, en las unidades superiores (Fms. Tumbes y Mal Pelo), genera una BSR discontinua identificada en los perfiles sísmicos por anomalías escalonadas de alta amplitud (Figuras 4.11 y 4.12). Esta BSR discontinua se relaciona con una alta actividad tectónica en la zona conocida como mega cizalla de Dolores-Guayaquil.

5.3 Morfotectónica y evolución de cuencas

En base a la cartografía morfotectónica realizada en este trabajo (Figura.5.2), donde se correlacionan las estructuras oceánicas con las del margen continental, se propone un esquema tectónico que diverge con modelos de evolución de cuencas publicados con anterioridad, especialmente para la cuenca de Tumbes. La correlación morfotectónica permite deducir que el comienzo de la zona de megacizalla de Tumbes-Guayana desarrollada en el margen continental peruano es la prolongación de las fallas transformantes de Alvarado, que compartimentan la placa de Nazca. La interpretación estructural de la línea sísmica multicanal que cruza la cuenca de Tumbes (Figura 4.12) muestra que el profundo depocentro en su conjunto, está delimitado por dos fallas de desgarre, siendo la falla de Muerto-Pananga al sur, y la falla del Banco Perú. Éstas son las prolongaciones de las fallas transformantes de Alvarado 1 y 2 respectivamente (Figura 5.2). En ningún caso, se observa que la cuenca de Tumbes está originada por un sistema de subducción como ha sido propuesto por Espurt *et al.* (2018), como parte del sistema Cenozoico de cuencas de antearco. Este modelo es válido para la cuenca eocena de Talara pero no para la generación de la cuenca de Tumbes. Por tanto, la cuenca de Tumbes debe ser considerada como una cuenca de un margen transformante y no de subducción como las cuencas Cenozoicas anteriores. Las estructuras de desgarre son activas en la actualidad con las emisiones de fluidos localizadas en los bordes de la falla del Banco Perú, y en la prolongación de la falla de Muerto-Pananga, denominada como falla de Tumbes (Figura 5.2). Ambas fallas de desgarre delimitan el inicio occidental de la denominada zona de megacizalla de Tumbes-Guayana (Fildani *et al.*, 2008).

5.4 Evolución de estilos estructurales

Por tanto, en este trabajo proponemos la siguiente evolución de los estilos estructurales relacionado con el sistema de hidrocarburos a lo largo del margen continental del NO del Perú:

- a) Paleo-prisma de acreción mesozoico;
- b) Cuenca antearco eocena; y
- b) Cuenca transtensiva desde el Oligoceno-Mioceno.

Cada uno de estos estilos conlleva características particulares del sistema de hidrocarburos como son la localización de los depocentros sedimentarios y el sistema de fracturas específicos para favorecer la migración de fluidos desde las rocas generadoras (y/o almacenes secundarios) hacia la superficie del fondo marino. La síntesis gráfica de estos 3 sistemas se presenta en las Figuras 5.3 y 5.4.

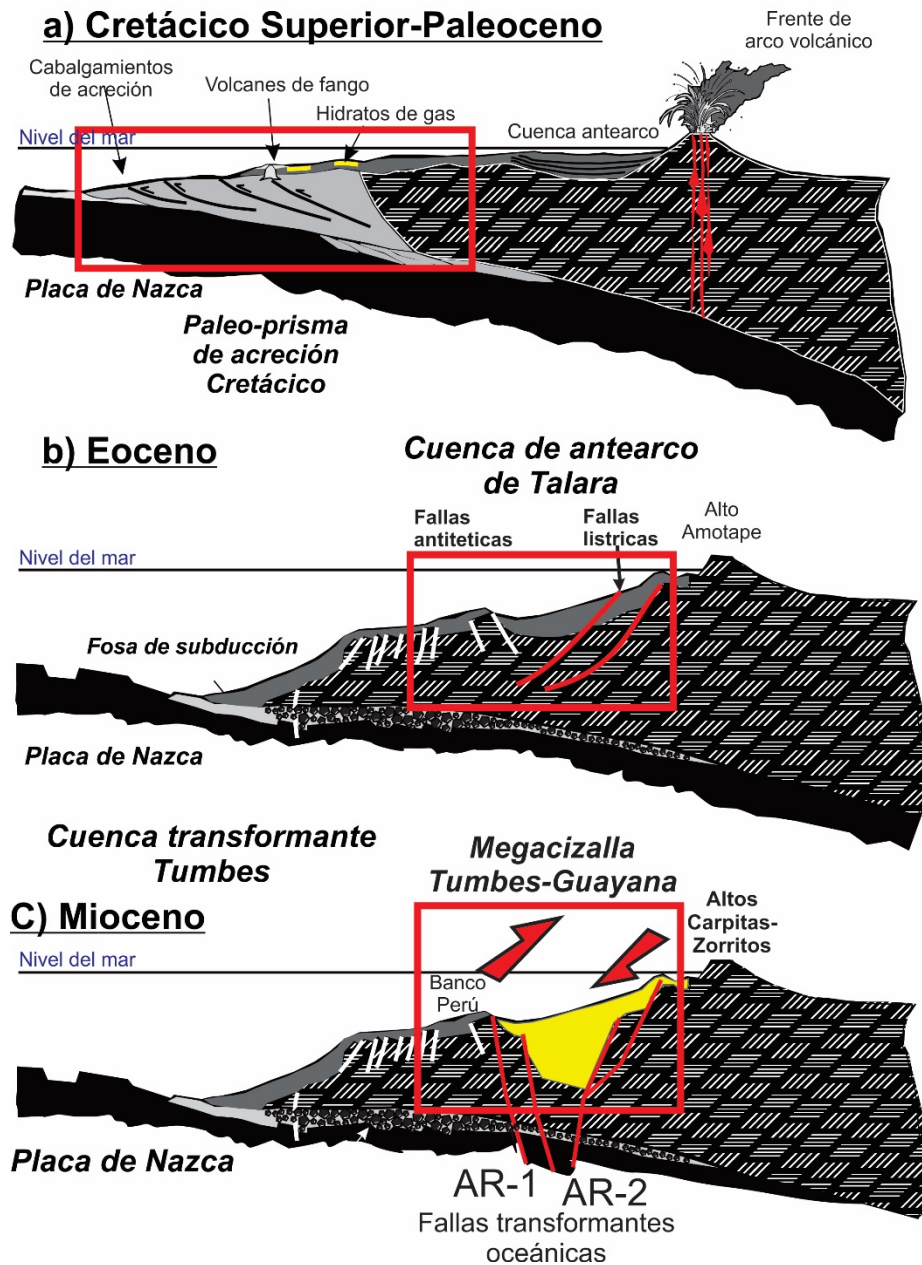


Figura 5.3 Evolución geodinámica y contexto estructural relacionado con las emisiones de hidrocarburos en las cuencas Talara y Tumbes (modificado y adaptado de Calves *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

El análisis conjunto de la batimetría y la distribución de plumas acústicas y la interpretación de los perfiles sísmicos de multicanal en las cuencas Talara y Tumbes en el margen continental de Perú ha permitido mejorar el conocimiento de la generación, migración y almacenamiento de hidrocarburos, así como las características sedimentarias y estructurales de las cuencas Talara y Tumbes. De los resultados de este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Existe una estrecha relación entre las geoformas de migración de fluidos de hidrocarburos identificados sobre el fondo marino ("*pockmarks*", montículos y volcanes de fango) y las numerosas plumas acústicas en la columna de agua en la plataforma y talud continental.
2. Se han identificado un total de 617 geoformas submarinas relacionadas con emisiones submarinas de hidrocarburos. Las geoformas submarinas identificadas incluyen campos de *pockmarks*, montículos (posiblemente formado por carbonatos autigénicos derivados de la oxidación de metano, MDACs) y volcanes de fango que se distribuyen en plataforma y talud continental.
3. Las emisiones están relacionadas con tres sistemas estructurales desde la plataforma al talud inferior del margen continental: a) Paleo-prisma de acreción mesozoico; b) Cuenca antearco eocena y b) Cuenca transtensiva desde Oligoceno-Mioceno Inferior hasta la Actualidad.
4. En el primer sistema, el paleo-prisma de acreción mesozoico y el sistema empuje paleozoico de Carpitás y Zorritos en el norte, y de Paita y de Amotapes en el sur, es el responsable de las emisiones submarinas identificadas en la plataforma interna y en los cañones submarinos como el de Talara, que inciden dicha plataforma hasta la costa. Los fluidos son expulsados desde las unidades paleozoicas (Fm. Amotapes) y del Cretácico Inferior (Fm. Muerto-Pananga) hasta los frentes de los cabalgamientos de bajo ángulo, donde ascienden verticalmente.
5. Del mismo modo, en el primer sistema, se identificaron campos de *pockmarks* submarinos en la plataforma interna alimentados por chimeneas acústicas resultado de la expulsión de fluidos en el paleo-prisma de acreción durante el Cretácico Superior. Asimismo, se han identificado "biconos" sísmicos interpretados como volcanes de fango enterrados resultado de la expulsión de fluidos en el frente del prisma de acreción. Estos volcanes de fango enterrados almacenan fluidos ricos en hidrocarburos y así, pueden actuar, a su vez, como reservorios "secundarios" para generar emisiones actuales identificadas en los fondos marinos.

6. El segundo sistema, la cuenca antearco eocena de Talara se localiza en el talud superior y medio del margen continental, y está caracterizado por fallas lítricas de bajo ángulo que se desarrollan desde la plataforma externa hasta el talud inferior. En relación con este sistema, se localizan niveles de BSR en el talud continental del sector sur de la zona de estudio que actúan como zonas de inestabilidad del mismo talud. Los hidratos de gas en la cuenca Talara tienen como fuente, rocas generadoras del Cretácico (Fms. Muerto-Pananga, y Redondo) y/o Paleoceno-Eoceno Inferior (Fm. Balcones-Salina), aunque pueden provenir también de reservorios paleozoicos.
7. El tercer sistema, la cuenca transtensiva de Tumbes, se desarrolla desde el Oligoceno Superior a la Actualidad. Las emisiones de hidrocarburos tienen lugar a través de las estructuras en flor de tipo transtensivo en zonas profundas, ligadas con la falla de Talara en el sector sur, y con las fallas de desgarre de Muerto-Pananga y del Banco Perú en el sector norte. La fuente de dichas emisiones de gas proceden de las unidades del Paleozoico (Fm. Amotapes) y del Mioceno Inferior-Medio (Fms. Heath y Cardalitos) a través de conductos subverticales.
8. La tectónica constituye el factor de control principal en los procesos de migración de hidrocarburos. Los cabalgamientos del sistema mesozoico y paleozoico provocan la expulsión de fluidos formando grandes chimeneas acústicas que afectan a la plataforma interna. Las fallas extensionales eocenas de la cuenca Talara, funcionan en la mayoría de los casos como vías permeables de hidrocarburos hacia la superficie (al menos de gas), afectando la plataforma externa y talud superior. La migración de fluidos a través estas fallas lítricas generan un BSR continuo en el talud continental al sur de la zona de estudio. Las fallas subverticales normales en zonas profundas de la cuenca Tumbes, funcionan como conductos de migración de hidrocarburos desde las unidades del Paleozoico hasta la unidad La Cruz, formando BSRs escalonados debido a la actividad tectónica al norte de la zona de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aizprua**, C., Witt, C., Johansen, S. E., & Barba, D. (2019). Cenozoic stages of forearc evolution following the accretion of a sliver from the Late Cretaceous-Caribbean large igneous province: SW Ecuador-NW Peru. *Tectonics*, 38, 1441–1465. <https://doi.org/10.1029/2018TC005235>
- Ancco**, O. H. (2019). Plumas de gas y rasgos morfológicos a lo largo del margen convergente peruano entre Punta Sal y Punta Pariñas. *Tesis de grado*. Universidad Nacional Federico Villarreal. 112 p.
- Andamayo**, K., & Fuentes, J. (2015). Plays exploratorios pre-terciarios dentro del lote Z-2B, cuenca productora de Talara en el offshore del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 110, 122-126.
- Auguy**, C., Calvès, G., Calderon, Y., & Brusset, S. (2017). Seismic evidence of gas hydrates, multiple BSRs and fluid flow offshore Tumbes Basin, Peru. *Marine Geophysical Research*, 38(4), 409-423.
- Boetius**, A., Ravensschlag, K., Schubert, C. J., Rickert, D., Widdel, F., Gieseke, A., ... & Pfannkuche, O. (2000). A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. *Nature*, 407 (6804), 623-626.
- Calvès**, G., Auguy, C., de Lavaissière, L., Brusset, S., Calderon, Y., & Baby, P. (2017). Fore-arc seafloor unconformities and geology: Insight from 3-D seismic geomorphology analysis, Peru, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18, 3062–3077, doi:10.1002/2017GC007036.
- Ceramicola**, S., Dupré, S., Somoza, L., & Woodside, J. (2018). Cold seep systems. In *Submarine geomorphology* (pp. 367-387). Springer, Cham.
- Daudt**, J. A. B. (2009) *Genetic flow unit definition in clastic reservoir based on depositional and diagenetic heterogeneities: A case study in Echinocyamus formation, lower Eocene, Talara basin, Peru* (Doctoral dissertation, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS).
- Daudt**, J. A. B., Pozo, E. G., Torres, K. M., & Ore, J. L. (2010). Evolução estratigráfica, arcabouço estrutural e potencial remanescente das unidades produtoras da Bacia de Talara (noroeste do Peru) na área do Lote X. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 18, 69-95.
- Díaz del Río**, V., Somoza, L., Martínez-Frías, J., Mata, M. P., Delgado, A., Hernández-Molina, F. J., ... & León, R. (2003). Vast fields of hydrocarbon-derived carbonate chimneys related to the accretionary wedge/olistostrome of the Gulf of Cádiz. *Marine Geology*, 195(1-4), 177-200.
- Diniz**, S. H., de Sá, F. R., Rodriguez, C., Santos, C. G., Cruz, J. M. N., & Beas, W. E. (2010, January). Talara Basin, Peru: Structural and Stratigraphic Characterization Based on 3D-Seismic Data. In *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Espurt**, N., Brusset, S., Baby, P., Henry, P., Vega, M., Calderon, Y., ... Saillard, M. (2018). Deciphering the Late Cretaceous-Cenozoic structural evolution of the North Peruvian forearc system. *Tectonics*, 37, 251–282. <https://doi.org/10.1002/2017TC004536>
- Fernández**, J., Martinez, E., Calderon, Y., Hermoza, W., & Galdos, C. (2005). Tumbes and Talara basins. Hydrocarbon evaluation. *PeruPetro* S.A., Basin Evaluations Group, Exploration Department, 130 p.
- Fildani**, A., Hessler, A. M., & Graham, S. A. (2008). Trench-forearc interactions reflected in the sedimentary fill of Talara basin, northwest Peru. *Basin Research*, 20(3), 305-331.

- Gulelmo** de Souza, P. H., Bustamante, E., & Castillo, J. A. (2012). Seismic Interpretation in an Ultra-Mature Area: Talara Basin, Peru. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012* (pp. 1-5). Society of Exploration Geophysicists.
- Gripp**, A. E., & Gordon, R. G. (2002). Young tracks of hotspots and current plate velocities. *Geophysical Journal International*, 150(2), 321–361. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01627.x>
- Herbozo**, G., Hübscher, C., Kaul, N., Wagner, M., Pecher, I., & Kukowski, N. (2013). Influence of recent depositional and tectonic controls on marine gas hydrates in Trujillo Basin, Peru Margin. *Marine Geology*, 340, 30-48.
- Judd**, A., & Hovland, M. (2009). *Seabed fluid flow: the impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge University Press
- Lajo**, J. A. , Fuentes, J. O., & Lajo, J. A. (2018). Nuevo modelo estratigráfico secuencial 4D de alta resolución de la Formación Mogollón para la optimización de la producción en el campo maduro Peña Negra offshore, cuenca Talara, Perú. *Resumen*. IX Seminario Internacional Exploración, Explotación, Procesamiento y Transporte de Hidrocarburos (INGEPET). Lima. 25 p.
- Lajo**, J. A., & Jiménez, P.E. (2011). Hipótesis sobre el origen y naturaleza de las "repeticiones del eoceno" en el modelado geológico 3D de los campos de Órganos offshore-onshore: El sistema de fallas Ostión. Cuenca Talara. *Resumen*. VII Seminario Internacional Exploración, Explotación, Procesamiento y Transporte de Hidrocarburos (INGEPET). Lima. 15 p.
- Laverde**, F., Pozo, G., Miranda de Oliveira, F., Carrillo, G., Torres, K. M., Sanchez, W., ... & Contreras, F. (2010). Detailed Facies Definition and 3D Static Model: Reservoir Management of the Eocene Producing Units in Block X of the Talara Basin in Northwest Peru. In *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Løseth**, H., Gading, M., & Wensaas, L. (2009). Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 26(7), 1304-1319.
- Morales**, M., Cerpa, L., Cornejo, T., Coaquira, F., Mamani, Y., De La Cruz, Y., & Arriola, D. (2019). Estudios de Geología Marina en el Perú. Morfología, Sedimentos y Recursos Geológicos. INGEMMET, *Informe técnico A6913*, 104 p.
- Morales**, M.; Cerpa, L.; Cornejo, T.; Girón, I.; Chacaltana, C., & Valdivia, W. (2020). Geología de la plataforma continental del Perú: paralelos 03°30' y 14°00' latitud sur. INGEMMET, *Boletín*, Serie D: Estudios Regionales, 32, 118 p.
- Ryan**, W. B. F., Carbotte, S.M., Coplan, J., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., Weissel, R.A., ... & Zemsky, R. (2009). Global Multi-Resolution Topography (GMRT) synthesis data set, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03014, doi:10.1029/2008GC002332.
- Tejada**, Z. & Gomes, E. (2015). Characterization of gas hydrate from geophysical data the region of Tumbes-Progreso Basin (PERU). In *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3-6 August 2015* (pp. 1222-1227). Brazilian Geophysical Society.
- Somoza**, L., Medialdea, T., León, R., Ercilla, G., Vázquez, J. T., Hernández-Molina, J., ... & Fernández-Puga, M. C. (2012). Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the Ceuta Contourite Depositional System (Western Alborán Sea). *Marine Geology*, 332, 4-26.
- Veloso**, M., Greinert, J., Mienert, J., & De Batist, M. (2015). A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders: Examples from the Arctic offshore NW-Svalbard. *Limnology and Oceanography: methods*, 13(6), 267-287.

ANEXO I: Perfiles de sismica de reflexión multicanal

Nº	Línea	Campaña	Cuenca	Año	Procesamiento	Cuenca sedimentaria	Longitud (m)
1	BEL79-61A	BELW G79LZ2	Talara	1979	Post-stack migration	Talara	13032.53
2	BEL79-78		Talara			5006.51	
3	BEL79-111*		Talara			52872.68	
4	BEL79-135		Talara			6122.10	
5	RIB93-08	RIBDGC93LZ	Tumbes	1993	Migration, finalmigration, stack. Reprocesamiento Kirchhoff PSTM stack	Talara	39336.12
6	RIB93-11		Tumbes			Talara	39750.56
7	RIB93-14		Tumbes			Talara	52279.87
8	RIB93-15		Tumbes			Talara	58918.63
9	RIB93-20		Tumbes			Tumbes-Talara	284311.20
	RIB93-00		Tumbes			Tumbes-Talara	95871.85
10	RIB93-00A		Tumbes		Reprocesamiento Kirchhoff PSTM Stack, Gathers	Talara	29282.50
11	OXY98-202	OXYWG98LZ3	Tumbes	1998	Raw migrated, migrated Deg angle stack	Talara	31398.15
12	PTP98-02	PETPMS98LZ2B	Talara	1998		Talara	22059.69
13	PTP98-10		Talara			Tumbes-Talara	79253.61
14	PTP98-16*		Talara			Talara	66907.11
15	PTP98-24		Talara			Talara	31102.72
16	PTP98-27		Talara			Talara	16876.86
17	PTP98-35*		Talara			Talara	18382.11
18	PTP98-NP-02		Talara			Talara	20098.62
19	PTP99-07	PETPET99LZ2B	Talara	1999	Kirchhoff time migration	Talara	47199.08
20	PTP99-11		Talara			Talara	20093.93
21	PTP99-26A		Talara			Talara	13889.99
22	PTP99-27		Talara			Talara	11534.41
23	PTP99-30		Talara			Talara	8983.05
24	PTP99-32		Talara			Talara	19807.33
25	PTP99-39		Talara			Talara	22182.09
26	PTP99-45A		Talara			Talara	8383.91
27	PTP99-46A		Talara			Talara	9597.31
28	PTP99-48		Talara			Talara	14285.72
29	PTP99-51		Talara			Talara	10779.27
30	PTP99-53		Talara		Kirchhoff time migration. Pre-stack time migrated gathers, stacks, AVO	Talara	9472.86
31	PTP99-54*		Talara			Talara	9683.30
32	PTP99-55A		Talara			Talara	11706.69
33	PTP99-57		Talara			Talara	27189.61
34	PTP99-62A		Talara		Kirchhoff time migration	Talara	44372.51
35	PTP99-74		Talara		Pre-stack migration	Talara	14582.17
36	PTP99-77A		Talara		Kirchhoff time migration	Talara	25759.38
37	PTP-2000-23*	PETPET00LZ2B	Talara	2000	Kirchhoff pre-stack migration	Talara	11703.54
38	PTP-LC2000-068		Talara	Kirchhoff time migration	Talara	13168.25	
39	PET00-01-2001-07	PETPET01LZ2B	Talara	2001	Stolt post migration	Talara	6390.07
40	PET00-02-2001-15		Talara		Kirchhoff post migration	Talara	15775.37
41	PET00-2001-016		Talara			Talara	16191.76
42	PET00-2001-020		Talara		Stolt post migration	Talara	12054.85
43	PET00-2001-022	Talara	Talara	10274.69			
44	NS-1	GOPSGA09LZ34	Talara	2009	DMO stack migration	Talara	130638.87
45	NS-8		Talara			Talara	76250.98
46	OE-24		Talara			Talara	23148.02
47	OE-31		Talara			Talara	15083.79
48	OE-49		Talara			Talara	20288.42
* SEG Y sin coordenadas						Total (m)	1643334.62
						Total (km)	1643.33